

Resumen

Este trabajo pretende mostrar la interacción del aire con un automóvil en circulación en estado estacionario y como mejorar su aerodinámica con la ayuda de programas de cálculo numérico basados en la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD). Se estudia un modelo de turismo de serie al que posteriormente se le han añadido los apéndices aerodinámicos necesarios para mejorar su aerodinámica sin modificar la geometría inicial del modelo o sus prestaciones, como la potencia del motor o la fricción de los neumáticos.

Primero se han introducido los conceptos básicos de la aerodinámica que se requieren para entender el comportamiento del aire alrededor del turismo, las mejoras aerodinámicas que se quieren añadir y los resultados obtenidos. Una vez entendidos los conceptos, se ha diseñado manualmente la geometría del coche, con el programa de diseño *SolidWorks*, partiendo de un automóvil de geometría sencilla como es el modelo Peugeot 206 y se ha explicado el proceso para preparar la simulación del modelo en circulación con el programa de simulación *AnsysFluent*.

Obtenidos los resultados del modelo original, el siguiente paso, objetivo de este trabajo, ha sido proceder a la adición de los apéndices aerodinámicos, explicando previamente su funcionamiento teórico y analizando los resultados de las simulaciones con las mejoras aplicadas, evidenciando los resultados teóricos esperados. Se han llevado a cabo simulaciones a diferentes velocidades para conocer como varía el flujo alrededor del vehículo y los parámetros a estudiar como son los coeficientes de sustentación y de arrastre, proporcionales a la eficiencia aerodinámica, valor que se quiere maximizar siempre.

Para finalizar, interpretando los resultados, se obtiene que las mejoras aerodinámicas transforman un coeficiente de sustentación, inicialmente positivo, en negativo, por tanto, proporcionando un buen agarre del vehículo al suelo, muy importante para la circulación a velocidades elevadas. Pero además, se logra disminuir un 5,5% el coeficiente de resistencia al avance y mantener prácticamente constante la fuerza total de resistencia al avance.

Índice

RESUMEN	1
ÍNDICE	3
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	9
2.1. Origen del proyecto.....	9
2.2. Motivación	9
3. INTRODUCCIÓN	11
3.1. Objetivos del proyecto	11
3.2. Alcance del proyecto.....	11
4. AERODINÁMICA EN TURISMO	13
4.1. Fuerzas y momentos aerodinámicos	13
4.2. Flujo ideal alrededor de un vehículo.....	17
4.3. Comportamiento de un flujo viscoso. Capa límite.....	19
5. ESTUDIO DEL TURISMO DE SERIE	23
5.1. Introducción al CDF	23
5.2. Presentación del turismo: Peugeot 206	25
5.3. Dominio de control y mallado	27
5.3.1. Inflation.....	28
5.3.2. Optimización del dominio de control	30
5.3.3. Optimización de la malla	33
5.4. Obtención y visualización de resultados	34
5.4.1. Obtención de resultados.....	34
5.4.2. Introducción de planos de visualización de resultados.....	38
5.4.3. Visualización de resultados	40
6. MEJORAS AERODINÁMICAS	51
6.1. Spoiler delantero	51
6.2. Spoiler trasero	56
6.3. Faldones laterales.....	62
6.4. Difusor	64
6.5. Alternativas descartadas	69
6.5.1. Alerón.....	69
6.5.2. Placas de hundimiento	70

6.5.3. Efecto suelo	70
6.6. Visualización de resultados	71
6.7. Aumento de la carga aerodinámica	80
7. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO	83
7.1. Planificación temporal.....	83
7.2. Planificación presupuestaria.....	84
8. IMPACTO AMBIENTAL	87
9. CONCLUSIONES	89
10. BIBLIOGRAFÍA	91
10.1. Bibliografía de Imágenes	91
10.2. Referencias bibliográficas	92
10.3. Bibliografía complementaria	93
11. ANEXOS	95
A. Optimización del dominio de control y del mallado	95
B. Visualización de resultados del modelo de serie	100
C. Visualización de resultados de mejoras aerodinámicas	108
D. Visualización de resultados con más carga aerodinámica	127
E. Otros	135

1. Glosario

Aerodinámica: rama de la mecánica de fluidos que estudia la interacción entre cuerpos sólidos y los fluidos a través de los que se desplazan.

CFD: siglas de mecánica computacional de fluidos (del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Rama de la mecánica de fluidos donde se utiliza un ordenador para resolver ecuaciones algebraicas mediante algoritmos y así, predecir el flujo de un fluido.

Lift: fuerza aerodinámica perpendicular al avance de un objeto que viaja a través de un fluido. Puede ser positiva o negativa (*downforce*).

C_L : coeficiente aerodinámico de sustentación.

C_D : coeficiente aerodinámico de resistencia al avance.

C_M : coeficiente aerodinámico del momento de cabeceo.

F_D : fuerza de resistencia al avance o *Drag*.

F_L : fuerza de sustentación o *Lift*.

M : pitching momento o momento de cabeceo.

A_f : área proyectada frontal.

ρ : densidad del aire.

V : velocidad del aire.

P : Presión

Q : caudal.

S : superficie.

P_∞ : presión inicial del aire.

q_∞ : presión dinámica a velocidad y densidad inicial.

V_{∞} : velocidad inicial.

c_p : coeficiente de presiones.

Centro de presiones: Punto donde se aplica la resultante de todas las presiones aplicadas sobre un cuerpo.

Punto de estancamiento: Punto donde la velocidad del aire es cero, y en consecuencia, la presión es muy elevada.

Capa límite: zona del fluido que se encuentra perturbado por la presencia de un cuerpo con el que está en contacto. La zona de capa límite comprende desde la superficie del cuerpo hasta una altura donde la velocidad del fluido es 99% de la velocidad inicial del fluido.

Re: número de Reynolds.

μ : viscosidad dinámica del aire.

Ma: número de Mach.

V_s : velocidad del sonido.

X_T : distancia donde ocurre la transición de capa límite laminar a capa límite turbulenta.

δ_{max} : Altura máxima de la capa límite.

EDP: ecuaciones en derivadas parciales.

Cuerda: longitud característica del modelo.

K: energía cinética turbulenta.

ε : ratio de disipación de la energía cinética turbulenta.

Min Size: tamaño mínimo de elemento finito.

Proximity Min Size: proximidad mínima entre elementos finitos.

Max Face Size: tamaño máximo de cara de elemento finito.

Max Size: tamaño máximo de elemento finito.

Minimum Edge Size: tamaño mínimo de borde de elemento finito.

Growth Rate: índice de crecimiento.

Orthogonal Quality: calidad ortogonal de la malla.

Skewness: parámetro de calidad de la malla basado en la oblicuidad (*skewness*).

Inlet: cara de entrada del fluido.

Outlet: cara de salida del fluido.

Symmetry: cara de simetría del modelo.

c_{Lf} : coeficiente de sustentación en el eje delantero.

c_{LR} : coeficiente de sustentación en el eje trasero.

Línea de corriente: representa la trayectoria que describe una partícula individual del flujo.

Túnel de viento: cámara diseñada para reproducir y estudiar un flujo alrededor de un cuerpo.

Vórtice: flujo turbulento que rota respecto de un eje. Puede ser bidimensional o tridimensional.

Viscosidad: Resistencia a moverse a través de un fluido.

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

La situación energética actual está provocando el auge, en el mundo de la automoción de vehículos convencionales, de modelos híbridos y eléctricos. Las crisis financieras, la escasez de petróleo y la búsqueda de reducir la contaminación favorecen el uso de estos vehículos.

La aerodinámica juega un papel muy importante en la reducción del consumo y no solo como elementos estéticos, puesto que con unos pocos apéndices aerodinámicos y sin ser muy extravagantes ni modificar en exceso la geometría, se puede conseguir una gran reducción en el consumo, además de su función principal que es la generación de *downforce*.

2.2. Motivación

El interés por el mundo de la automoción y por el diseño industrial generó la motivación para ampliar los conocimientos adquiridos en la asignatura de mecánica de fluidos, así como de otras asignaturas, durante los estudios del grado de ingeniería industrial, y aplicarlo al estudio de la aerodinámica de un vehículo convencional y diseñar modificaciones que mejoren su eficiencia aerodinámica.

3. Introducció

3.1. Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es poner en práctica los conocimientos aprendidos en la asignatura de mecánica de fluidos durante el grado de ingeniería industrial, además de ampliarlos, para aplicarlos al estudio de la aerodinámica en la automoción. Para ello será necesario calcular las fuerzas que actúan sobre el vehículo en circulación, además de los coeficientes aerodinámicos de arrastre o C_D y de sustentación o C_L .

Para poder alcanzar el objetivo principal será necesario conocer como influye cada parte del vehículo en la aerodinámica y si se realizan pequeños cambios en algunas zonas, como afectan estos cambios en la aerodinámica del vehículo y como influye tanto localmente como en su totalidad al flujo de aire.

Por último, para llevar a cabo este proyecto se requiere familiarizarse tanto con el programa de diseño SolidWorks para diseñar la geometría del vehículo y de los apéndices aerodinámicos que se quieran añadir, ya que de la geometría depende obtener buenos resultados o no. Además de familiarizarse con el programa de simulación Ansys Fluent para aplicar la teoría de mecánica de fluidos para entender los resultados obtenidos mediante CFD.

3.2. Alcance del proyecto

Este tipo de estudios son muy frecuentes en las compañías automovilísticas como complemento a estudios en túneles de viento o pruebas en circuito cerrado. El motivo de su uso es el de abaratar costes puesto que realizar estudios de cálculo numérico con ordenador supone mucho menos coste que las otras opciones y se obtienen unos resultados fiables, pero nunca hay que tomarlos como definitivos, siempre se requiere la prueba real en un circuito.

En este caso, debido a la licencia de estudiante que se dispone para hacer el cálculo numérico, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, sirven para tener una idea de lo que las grandes compañías automovilísticas e incluso las escuderías de la Fórmula 1 son capaces de hacer. Además solo se estudiará el flujo

externo alrededor del vehículo, no se tendrá en cuenta el flujo interior que circula por la maquinaria o por dentro del turismo.

Los pasos a seguir en el estudio van a ser los siguientes:

- Estudio teórico de la aerodinámica en la automoción.
- Creación del modelo a estudiar mediante el programa de diseño SolidWorks.
- Preparación i obtención de resultados mediante el uso de CFD.
- Análisis de los resultados obtenidos, búsqueda y aplicación de mejoras aerodinámicas analizando las partes del vehículo por separado y que influencia tienen en la aerodinámica total del vehículo en caso de realizar alguna modificación.
- Estudio de impacto ambiental.
- Realización de una planificación temporal y económica del proyecto.
- Conclusiones.

4. Aerodinámica en turismo

Para poder analizar los resultados llevados cabos será necesario tener conocimiento sobre algunos conceptos teóricos sobre la aerodinámica aplicada a los automóviles. De esta forma se podrá extraer toda la información necesaria de los resultados y se tendrá la capacidad de encontrar y resolver los errores que puedan surgir.

4.1. Fuerzas y momentos aerodinámicos

En un coche circulando por carretera se pueden distinguir dos fuerzas principales que marcan una serie de factores como la velocidad máxima, la aceleración máxima, la maniobrabilidad o la estabilidad de la conducción. Los objetivos principales de la aerodinámica de automóviles son reducir la resistencia al avance (*drag*), reducir el ruido de viento, minimizar la emisión de ruido i evitar fuerzas de sustentación (*lift* positivo).

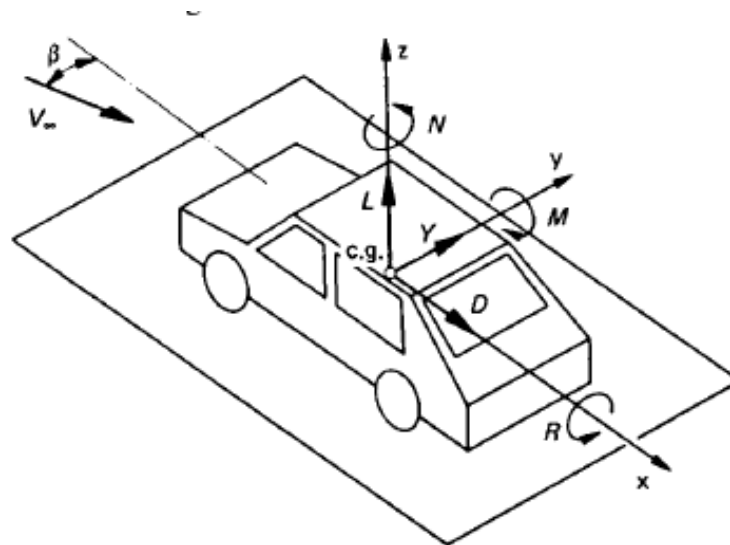


Fig. 4.1. Fuerzas y momentos sobre un turismo.

Observando la Fig. 4.1, en el caso particular del vehículo trabajando con simetría, solo recibe dos fuerzas, la de resistencia al avance y la de sustentación, y un momento, el de cabeceo.

- Fuerza de *drag* o de arrastre: resultante de las fuerzas que se generan sobre el vehículo en la orientación paralela a la dirección de avance y de sentido contrario. Puede ser *Drag* de presión (debido al desprendimiento de capa

límite) o de fricción (por el rozamiento del fluido con las superficies del vehículo). La ecuación del *drag* total es:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde c_D es el coeficiente adimensional de drag, A_f es el área frontal del vehículo, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad a la que circula el vehículo.

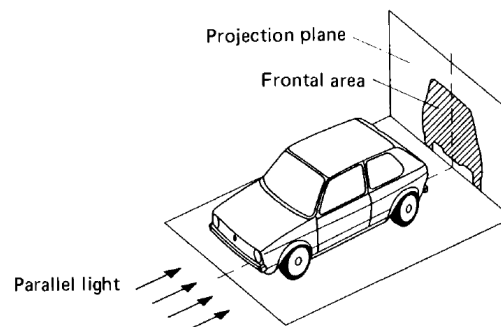


Fig. 4.2. Definición de área frontal de un vehículo.

- Fuerza de *lift* o de sustentación: resultante de las fuerzas que se generan sobre el vehículo en la orientación transversal al flujo de aire (vertical). Puede ser en dirección vertical positiva (*lift*) o en dirección vertical negativa (*negative lift* o *downforce*). La ecuación del *lift* total del vehículo es:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde c_L es el coeficiente adimensional de *lift*, A_f es el área frontal del vehículo, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad a la que circula el vehículo.

- Momento de cabeceo (M): es el resultante de la diferencia de fuerzas presentes entre la parte delantera y posterior del vehículo, o más concretamente, entre el eje delantero y el posterior.

$$M = \frac{1}{2} \cdot c_M \cdot L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde c_M es el coeficiente adimensional de *momento*, L es la dimensión característica del modelo, A_f es el área frontal del vehículo, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad a la que circula el vehículo.

La resistencia al avance total de un vehículo se puede dividir en 5 partes principales:

- Resistencia de forma: la forma del cuerpo determina si el flujo de aire pasa alrededor del vehículo con facilidad o si se desprende en algunas zonas.
- Resistencia de sustentación: es el resultado de cualquier fuera de sustentación que se genera a causa del desplazamiento del vehículo. La diferencia de presiones entre la parte superior y posterior del vehículo es la causa de la fuerza de *lift*.
- Resistencia de superficie: debida a la fricción del aire al pasar tangencialmente a lo largo del vehículo. Esta fricción es debida a la viscosidad del aire y tiene lugar en una zona muy cercana a la superficie del vehículo que se denomina capa límite, que se explica más adelante.
- Resistencia de interferencias: la producen las protuberancias existentes en el cuerpo.
- Resistencia de flujo interno: es la resultante de las pérdidas de energía debidas a la circulación del aire por el interior de la maquinaria y por el interior del vehículo. Como se ha comentado, esta parte de la resistencia no se tendrá en cuenta para simplificar los cálculos y se tratará el vehículo como un cuerpo macizo sin agujeros ni posibilidad de flujo interno.

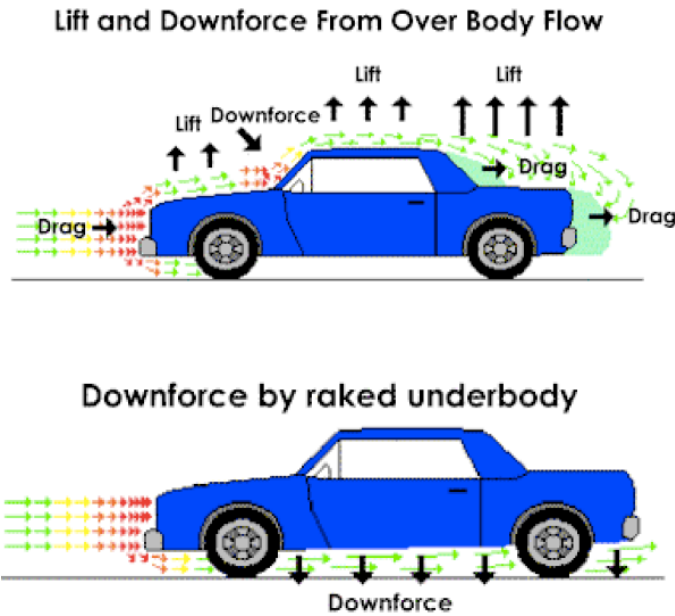


Fig. 4.3. Fuerzas aerodinámicas alrededor de un turismo

Al existir una distribución de fuerzas, existe un punto geométrico donde se aplican las fuerzas resultantes. Por tanto, en el caso de las fuerzas aerodinámicas, dicho punto se denomina centro de presiones, donde se aplican las fuerzas resultantes de *drag* y de *lift*. Además, la resultante de los momentos aplicados al centro de presiones resulta cero (Fig. 4.4).

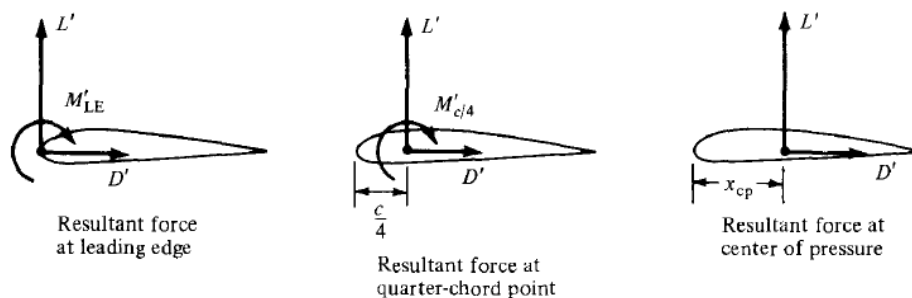


Fig. 4.4. Centro de presiones

El centro de presiones es un punto teórico, y como tal, no existe y no tiene porque corresponder a ningún punto del cuerpo.

4.2. Flujo ideal alrededor de un vehículo

Para tener una primera idea, cuando el vehículo circula en estado estacionario a una velocidad determinada, se puede considerar que el flujo de aire que rodea el vehículo está formado por líneas de corriente, donde dichas líneas contienen las partículas sucesivas con velocidad tangente a la línea de corriente, para un instante t . Las líneas de corriente no varían en función del tiempo debido a que se trabaja en estado estacionario.

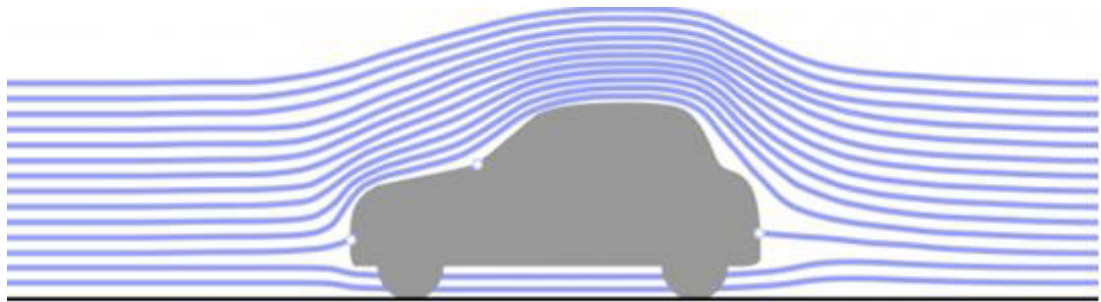


Fig. 4.5. Representación de un flujo ideal alrededor de un vehículo

Si se agrupan las líneas de corriente se pueden formar tubos de corriente, cada uno aislado del resto, donde se considera que el fluido que los atraviesa es incompresible, no viscoso y donde la energía se mantiene constante a lo largo del tubo. Cada línea recorre el vehículo modificando la trayectoria para adaptarse a la forma del vehículo y al movimiento de las demás líneas. Para saber cómo se comporta el flujo de aire a lo largo del vehículo se utiliza la ecuación de Bernoulli para flujo ideal:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = cte \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde P es la presión, ρ es la densidad del aire y V es la velocidad del fluido.

Esta ecuación implica que la suma de presión estática (P) y la presión dinámica ($\rho \cdot V^2 / 2$) tiene que ser constante variando el parámetro constante según la línea de corriente escogida. De esta forma se puede conocer la variación del valor de la presión y de la velocidad a lo largo de la circulación del fluido alrededor del vehículo.

A partir de la ley de conservación de la masa y dado que el fluido es incompresible, se tiene la condición de continuidad, donde el caudal (Q) del fluido se mantiene constante:

$$Q = V \cdot S = cte \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde V es la velocidad del fluido y S es la superficie transversal del tubo de corriente.

Con un ejemplo fácil, considerando el flujo bidimensional, el aire que circule por la parte superior recorrerá el capó y el parabrisas hasta el punto de máxima altura del techo. Durante este trayecto las líneas de corriente se han ido juntando y apretando reduciendo el área transversal de los tubos de corriente como se observa en la Fig. 4.5. De la Ecuación 4.5 se puede extraer que si el área transversal disminuye, para mantener el caudal constante, la velocidad en ese tramo debe aumentar. Ahora, de la Ecuación 4.4 se extrae que si aumenta la velocidad, la presión estática debe disminuir para mantener la presión total constante. A partir de este punto de máxima velocidad y mínima presión, las líneas de corriente se van separando, la velocidad va disminuyendo y la presión aumenta hasta que abandonan el vehículo por la parte trasera. Las líneas de corriente que van por la parte inferior no varían mucho puesto que la distancia al suelo se mantiene más o menos constante. De esta forma, se puede graficar la distribución de presiones y de velocidades alrededor del vehículo.

Utilizando el coeficiente de presiones se puede comprobar como varia la presión, encontrar los puntos de estancamiento ($V = 0$, $c_p = 1$) i las zonas de succión ($c_p < 1$). El coeficiente de presión se puede calcular como:

$$c_p = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty} \right)^2 \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Donde P es la presión local del fluido, P_∞ es la presión inicial del fluido, q_∞ es la presión dinámica a velocidad y densidad inicial, V es la velocidad local del fluido y V_∞ es la velocidad inicial del fluido.

Por la parte superior del vehículo se tienen tres puntos de estancamiento que se observan en la Fig. 4.5. Corresponden al parachoques frontal, a la unión del capó con el parabrisas frontal y la parte posterior del vehículo. Como se observa en la Fig. 4.3, las zonas de succión se encuentran en el capó, antes de llegar al punto de estancamiento con el parabrisas, y a lo largo del techo donde el fluido se acelera

disminuyendo así la presión y generando, por tanto, un *lift* positivo. Por la parte inferior, se genera un *lift* negativo, que puede llegar a ser muy significativo modificando parámetros como la altura respecto al suelo o añadiendo spoilers frontales y/o laterales por ejemplo. El *lift* generado en la parte superior es mayor que el generado en la parte inferior, hecho que, dependiendo del peso, puede provocar un *lift* total positivo hacia arriba que tienda a separar el vehículo del suelo.

4.3. Comportamiento de un flujo viscoso. Capa límite.

En el estudio del caso ideal, para el estudio del *drag*, si se integra la distribución de presiones a lo largo del modelo, se obtendría un *drag* igual a cero, resultado nada realista de lo que se sabe por experiencia. Es lo que se conoce como paradoja de D'Alembert. Se debe a que se han despreciado los efectos viscosos del aire en la zona de contacto del aire con el vehículo.

Para el estudio de un caso real de flujo alrededor de un cuerpo, se debe considerar una pequeña zona muy cercana al cuerpo, de unos pocos centímetros o milímetros, donde actúan las fuerzas viscosas. Esta zona se denomina “capa límite”. Fuera de esta zona, el fluido se puede tratar como no viscoso, pero en el interior existe un gradiente de velocidades desde la superficie del vehículo, donde se tiene velocidad cero, hasta la frontera de la capa límite, que se encuentra a una altura que por definición la velocidad en la frontera es del 99% la V_∞ .

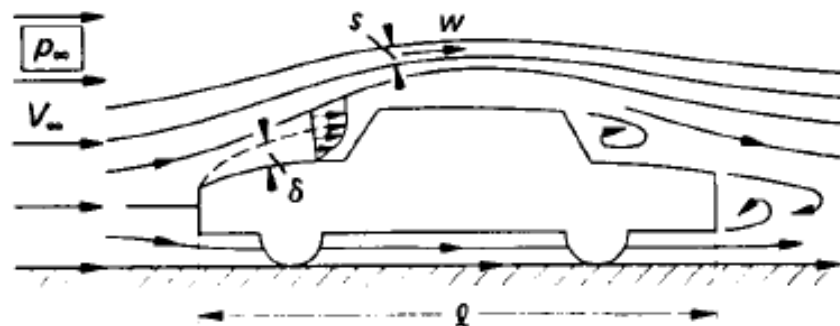


Fig. 4.6. Flujo real alrededor de un vehículo.

En un caso real, como se tienen en cuenta los efectos de la viscosidad, la condición de flujo ideal no se cumple en todo el flujo y no se puede aplicar la Ecuación 4.4 entre dos puntos cualquiera, solo se puede aplicar entre dos puntos que estén fuera

de la capa límite, donde los efectos de la fricción no estén presentes. Para la condición de incompresibilidad, esta quedará siempre garantizada por la velocidad de trabajo subsónica con un número de Mach (M) pequeño.

$$M = \frac{V}{V_s} \quad \text{Ecuación 4.7}$$

Donde V es la velocidad del fluido y V_s corresponde a la velocidad del sonido que es de 343 m/s.

Para números de Mach inferiores a 0,7 el régimen de trabajo es subsónico. En este trabajo se harán estudios a 3 velocidades diferentes de 20 m/s, 35 m/s y 50 m/s, lo que se corresponde con 72 Km/h, 126Km/h y 180 Km/h respectivamente. La elección de estas velocidades se explicará más adelante. A estas velocidades les corresponde un número de Mach de 0.058, 0.102, 0.146 respectivamente.

Se pueden distinguir dos tipos de capa límite, una laminar y otra turbulenta. La capa límite laminar se produce en la parte frontal o en el primer tramo de contacto del fluido con el cuerpo. En este tramo el flujo es estable y sin fluctuaciones de velocidad. A medida que avanza el flujo, la capa límite va aumentando de grosor hasta que a una cierta distancia se produce la transición a la capa límite turbulenta. En el interior de la capa límite turbulenta el flujo se vuelve inestable y ahora la velocidad ya no solo depende de la distancia a la superficie sino también del tiempo. Se trabaja, por tanto, con la velocidad media temporal teniendo en cuenta que se producen fluctuaciones en todas direcciones. A partir de la transición, el grosor de la capa límite sigue creciendo, pero ahora de una forma más rápida y la velocidad del flujo en la zona más cercana a la superficie aumenta, con lo que el gradiente de velocidades en esta zona también aumenta, y con ello las fuerzas de fricción, tal como se observa en la Fig. 4.7.

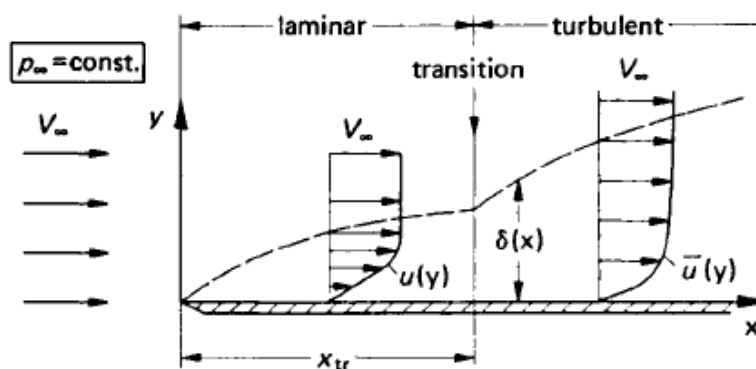


Fig. 4.7. Evolución de la capa límite sobre un placa plana.

Para estudiar el comportamiento de la capa límite se puede hacer el estudio de un flujo de aire alrededor una placa plana. Para los cálculos, se toman valores que se usan a lo largo del trabajo: una longitud característica de 3,5 m (valor de la longitud del coche) y una velocidad de 35 m/s (126 Km/h).

Para conocer numéricamente si un flujo es laminar o turbulento se utiliza el número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde V_{∞} es la velocidad inicial del fluido, l es la longitud característica del cuerpo, ρ es la densidad del fluido y μ es viscosidad dinámica del fluido.

Sabiendo que la transición de capa límite laminar a turbulenta ocurre a un $Re_t = 10^5$, con una densidad del aire de $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ y con una viscosidad dinámica de $\mu = 1,825 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$, se obtiene que la transición ocurre a una distancia:

$$x_t = \frac{Re_t \cdot \mu}{V_{\infty} \cdot \rho} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1,825 \cdot 10^{-5}}{35 \cdot 1,2} = 0,233m \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Se puede calcular teóricamente además el grosor máximo de dicha capa límite para la misma placa y en las mismas condiciones:

$$\delta_{\max} \cong \sqrt[5]{\frac{\mu}{\rho \cdot V_{\infty}}} \cdot l^{\frac{4}{5}} = 0,145m \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Se observa como la longitud de la capa límite laminar tan solo representa el 6,6% de la longitud total de 3,5 m. Para el caso se puede considerar que toda la capa límite se comporta como turbulenta para simplificar. Mencionar que el cálculo solo es orientativo ya que se aproxima la geometría de un coche a la de una placa plana, pero sirve para comprobar que para cuerpos alargados, la capa límite laminar se puede despreciar.

En el estudio de la placa plana, el flujo avanza por una superficie transversal siempre constante, pero en el flujo alrededor de un vehículo puede darse el caso que un cambio de dirección provoque la separación de la cama límite. Si a medida que el fluido avanza, la presión va aumentando, la velocidad irá disminuyendo según la *Ecuación 4.4*. Esto puede provocar que dentro de la capa límite, donde existe un gradiente de velocidades, esta disminución de velocidad junto con los efectos viscosos, de lugar a una velocidad cero en la superficie. Esto provoca que el flujo no

pueda avanzar y de lugar a una recirculación en dirección contraria, lo que provocará la separación de la capa límite como se puede observar en la Fig. 4.8

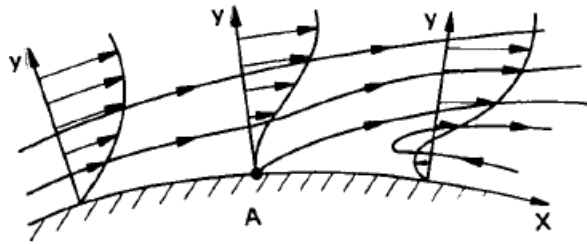


Fig. 4.8. Separación de la capa límite.

La separación de la capa límite es uno de los sucesos más importantes, sino el más importante de estudio, ya que provoca la aparición de vórtices y recirculaciones de flujo causantes del aumento del *drag*, conocido como *drag* de presión. Por lo tanto, se pueden distinguir dos tipos de *drag*, como se ha comentado ya anteriormente, el *drag* de fricción debido al rozamiento que se produce en la capa límite, y el *drag* de presión, producido por la separación de la capa límite en las distintas partes del vehículo que produce una diferencia de presión negativa entre la parte frontal del cuerpo y la parte trasera.

5. Estudio del turismo de serie

Para poder hacer el estudio de mejoras aerodinámicas sobre un turismo convencional se requiere un estudio previo del turismo de serie. Este primer estudio sirve para validar tanto el diseño del vehículo como el modelo de simulación utilizado y sirve como referencia para los estudios posteriores. El estudio se lleva a cabo mediante el programa Fluent, un software basado en la mecánica computacional de fluidos (CFD), desarrollado por la empresa Ansys.

5.1. Introducción al CDF

Para el estudio de fluidos, estos se modelan mediante ecuaciones con derivadas parciales (EDP) que representan la conservación de la masa, de la energía y del momento angular. Todo este conjunto de expresiones reciben el nombre de ecuaciones de Navier-Stokes. Para conocer el movimiento del fluido alrededor del vehículo habría que resolver una gran número de ecuaciones para cada punto del fluido y para cada instante de tiempo. Es por ello, por lo que se utiliza el CFD. La Dinámica Computacional de Fluidos es una rama de la mecánica de fluidos donde se utiliza un ordenador que sustituye las EDP por ecuaciones algebraicas para resolver el caso, consiste en una aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes y que permite hacer los cálculos de forma más rápida y predecir el flujo del fluido.

Hay que tener en cuenta que los estudios con CFD son una aproximación, siempre servirán como complemento a los estudios en un laboratorio o en un circuito, pero nunca como prueba definitiva. Estos estudios son utilizados para abaratar costes, puesto que con un ordenador potente se pueden obtener muy buenos resultados y reducir el tiempo posterior de pruebas en laboratorio y circuito cerrado.

La transformación del conjunto de ecuaciones en derivadas parciales en ecuaciones algebraicas se lleva a cabo discretizando el sistema en elementos finitos muy pequeños en contacto entre ellos dentro de un dominio de control (creación de la malla). El programa resuelve para cada elemento finito las ecuaciones algebraicas obteniendo un resultado aproximado de la realidad teniendo en cuenta la media de los resultados obtenidas en cada uno de los elemento finitos.

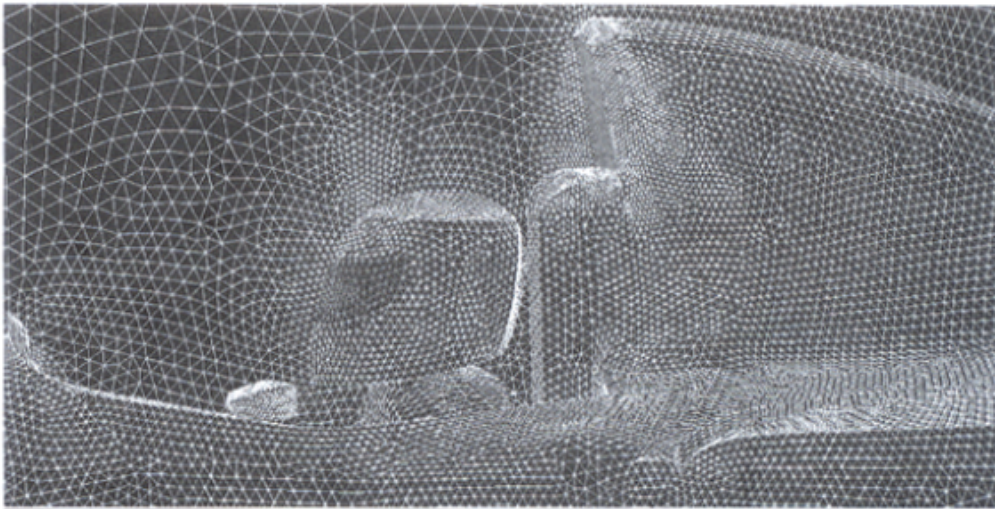


Fig. 5.1. Representación de los elementos finitos en un dominio de control.

El análisis de CFD se puede dividir en tres etapas fundamentales: pre-procesado, solución y post-proceso.

- En el pre-procesado se crea o se obtiene la geometría del modelo, se define el dominio de control y se crea la malla.
- Durante el proceso de solución se define el método de cálculo, las condiciones de contorno del dominio de control, los parámetros del fluido y del material del modelo, el objetivo de los residuos y el número de iteraciones máximo. Los residuos son la diferencia que existe entre el valor de la solución encontrada en una iteración y el valor obtenido de la iteración anterior. Los residuos son un mecanismo útil que sirve, de una forma visual en forma de gráfica, para visualizar si la simulación va por buen camino a la convergencia (residuos cada vez más pequeños) o si por el contrario diverge (los residuos aumentan).
- Por último, en el post-procesado, se analizan los resultados obtenidos graficando o animando propiedades del fluido como pueden ser la velocidad o la presión. Esta etapa permite comparar los resultados obtenidos con la realidad y validar así el modelo o proponer mejoras.

En este proyecto, se ha utilizado el programa de cálculo numérico Fluent, de la empresa Ansys, con una licencia de estudiante para llevar a cabo el análisis de CFD. Esta licencia de estudiante tiene una limitación de número de elementos finitos capaz de simular, que es de aproximadamente 500.000 elementos. Dicha limitación es el motivo por el cual se opta, como se explica más adelante, por simplificar la geometría o escalar el modelo al 50%, para poder aplicar una malla en condiciones, con menos elementos, que permita obtener unos resultados fiables.

5.2. Presentación del turismo: Peugeot 206

Se parte de un vehículo con una geometría sencilla (Fig. 5.2) del cual se ha hecho una copia manual lo más fiel posible para simplificar su geometría y así reducir el número de superficies, con la finalidad de facilitar la resolución del problema (Fig. 5.3). Este proceso se ha llevado a cabo con el programa *SolidWorks* y con la herramienta *splines*. Además se le ha hecho un corte en la parte inferior de las ruedas (un corte de 10 cm de altura) para que el contacto con el suelo no sea puntual, y de la misma manera, facilitar la resolución del problema y la convergencia más rápida a la solución (Fig. 5.4).

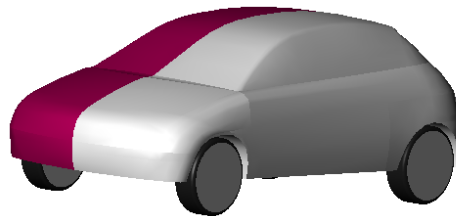


Fig. 5.2. Modelo de Peugeot 206 original.

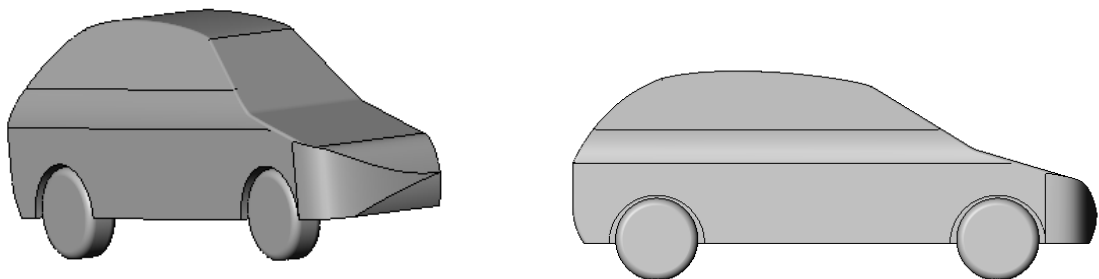


Fig. 5.3. Modelo diseñado manualmente.



Fig. 5.4. Visualización de los cortes hechos en las ruedas.

A continuación se presentan algunos de los datos más importantes para el proyecto sobre la ficha técnica del Peugeot 206:

Ficha técnica del Peugeot 206	
Tracción	Delantera
Longitud	3,5 m
Ancho	1,6 m
Altura	1,4 m
Peso	1000 kg
Velocidad máxima	175 km/h
Diámetro de las ruedas	0,55 m

Tabla 5.1. Detalle de la ficha técnica del Peugeot 206

Dadas las limitaciones del ordenador y del programa, se han llevado a cabo una serie de simplificaciones en la geometría para facilitar el cálculo de las simulaciones y evitar errores en el mallado en superficies complejas:

- El vehículo se ha tratado como una **masa homogénea**. No se tienen en cuenta espacios huecos en el interior como la cabina de pasajeros o el maletero ni otros elementos como el motor que puedan añadir masa. Estas simplificaciones pueden afectar a la posición del centro de masas entre otras cosas.
- **Flujo interno nulo**. Como ya se ha comentado anteriormente, no se consideran agujeros ni espacios huecos en el interior del vehículo por donde pueda circular el fluido, como por ejemplo entradas de aire para refrigerar el motor o los frenos. Solo se tiene en cuenta el flujo externo al vehículo.
- **Eliminación de los retrovisores**. Para este trabajo no se tiene en cuenta la aportación de los retrovisores ya que dicha aportación sería un aportación constante en todos los estudios y ninguna medida de mejora aerodinámica está enfocada a este aspecto. Además la inclusión de los retrovisores puede generar problemas de mallado. Comentar que en un estudio real no se pueden despreciar puesto que modifican de una forma considerable el flujo alrededor del vehículo.
- **Fondo plano**. La parte inferior del vehículo se considera de forma plana sin irregularidades como podrían ser en un caso real: ejes, barras, depósitos... Esta simplificación repercutirá en los resultados obtenidos, sobretudo en el valor del *drag*, debido a que estos provocan un gran rozamiento con el fluido.

- **Escala del 50%.** Finalmente, una vez hecha la geometría se ha optado por escalar el modelo al 50% tal y como hacen la mayoría de escuderías de F1 para los estudios en túneles de viento. El motivo de esta simplificación es la limitación del programa ya comentada. Para llevar a cabo esta simplificación es necesario comprobar la equivalencia aerodinámica de los dos modelos: real y escalado. Esta comprobación se realiza mediante la similitud del número de Reynolds entre ambos modelos. Calculando el Reynolds a una velocidad de 35 m/s (126 Km/h) se obtiene para el modelo real un Reynolds de $8,2 \cdot 10^6$ y para el modelo escalado de $4,1 \cdot 10^6$. En definitiva, se puede afirmar que existe similitud puesto que ambos valores son superiores a 10^5 y ambos flujos son turbulentos. Por lo tanto se ha optado por hacer las simulaciones con el modelo escalado a la misma velocidad con la que se haría con el modelo real, ya que para tener las mismas condiciones en el modelo escalado que en el real, la simulación debería llevarse a cabo a velocidades extremadamente altas incapaces de simular y de generar en un túnel de viento. Además, con velocidades muy superiores, el flujo dejaría de ser incompresible. Una vez hecho el escalado, el coche queda con las siguientes medidas:
 - Longitud (cuerda) = 1,75 m
 - Altura = 0,7 m
 - Ancho = 0,8 m
 - Radio de las ruedas = 0,1375 m
 - Corte en las ruedas a una altura de 5 cm

5.3. Dominio de control y mallado

En este apartado se ha procedido a hacer el estudio del dominio de control alrededor del coche que representará el fluido de estudio alrededor del coche y la malla óptima que se ha usado para resolver el problema.

El dominio de control viene a ser como una “caja” que se dibuja alrededor del modelo de estudio que representa el fluido a estudiar. En este caso se estudia como varía un flujo de aire al circular el vehículo en estado estacionario. Se pretende obtener un dominio de control óptimo que permita interpretar los resultados sin perder información, en caso que sea demasiado pequeño, y que no sea demasiado grande, ya que supondría un elevado número de elementos finitos y una carga mayor de tiempo de simulación. Para ello se parte de un dominio de control grande, con unos valores que se usan por norma en estudios de automoción y que se irán reduciendo si es posible según estos parámetros:

- H: altura del dominio de control.
- L1: distancia por delante del vehículo.
- L2: distancia por detrás del vehículo.
- Z: ancho del dominio de control.

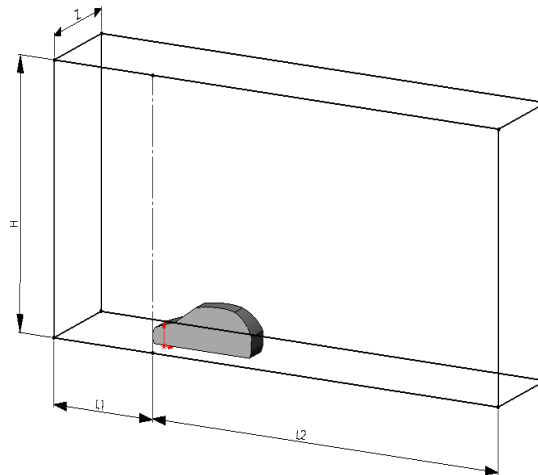


Fig. 5.5. Representación del dominio de control.

5.3.1. Inflation

Representa una parte de la malla, formada por elementos rectangulares alrededor del vehículo, de espesor reducido, para el estudio de la capa límite.

Para un flujo turbulento y viscoso como el que se tiene, conocida la cuerda del modelo (1,75 m) y los parámetros característicos del aire (densidad = $1,2 \text{ Kg/m}^3$ y viscosidad dinámica = $1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m}\cdot\text{s}$), se calculan los parámetros del *inflation* para las diferentes velocidades de estudio: el valor de la primera celda del *inflation*, el grosor máximo de la capa límite y el número de capas de celdas rectangulares.

Velocidad de 20 m/s:

- De la Ecuación 4.8 se encuentra $Re = 2,3 \cdot 10^6$.
- El valor de la primera celda del *inflation* se calcula teóricamente a partir de una aproximación usada para cálculos de este estilo [1]: $y = 0,94 \text{ mm}$
- De la Ecuación 4.10 se extrae que el grosor máximo de la capa límite es de 35,7 mm.
- Por último, imponiendo un ratio de crecimiento del 20% en una celda y la consecutiva, se obtiene que para cubrir todo el grosor de capa límite son necesarias 12 capas de celdas rectangulares.

Velocidad de 35 m/s:

- De la Ecuación 4.8 se encuentra $Re = 4,1 \cdot 10^6$.
- El valor de la primera celda del *inflation* se calcula teóricamente a partir de una aproximación usada para cálculos de este estilo [1]: $y = 0,56mm$
- De la Ecuación 4.10 se extrae que el grosor máximo de la capa límite es de 31,8 mm.
- Por último, imponiendo un ratio de crecimiento del 20% en una celda y la consecutiva, se obtiene que para cubrir todo el grosor de capa límite son necesarias 14 capas de celdas rectangulares.

Velocidad de 50 m/s:

- De la Ecuación 4.8 se encuentra $Re = 5,8 \cdot 10^6$.
- El valor de la primera celda del *inflation* se calcula teóricamente a partir de una aproximación usada para cálculos de este estilo [1]: $y = 0,4mm$
- De la Ecuación 4.10 se extrae que el grosor máximo de la capa límite es de 29,68 mm.
- Por último, imponiendo un ratio de crecimiento del 20% en una celda y la consecutiva, se obtiene que para cubrir todo el grosor de capa límite son necesarias 15 capas de celdas rectangulares.

El valor del *inflation* se mantendrá siempre constante para todo el trabajo en las simulaciones de sus respectivas velocidades.

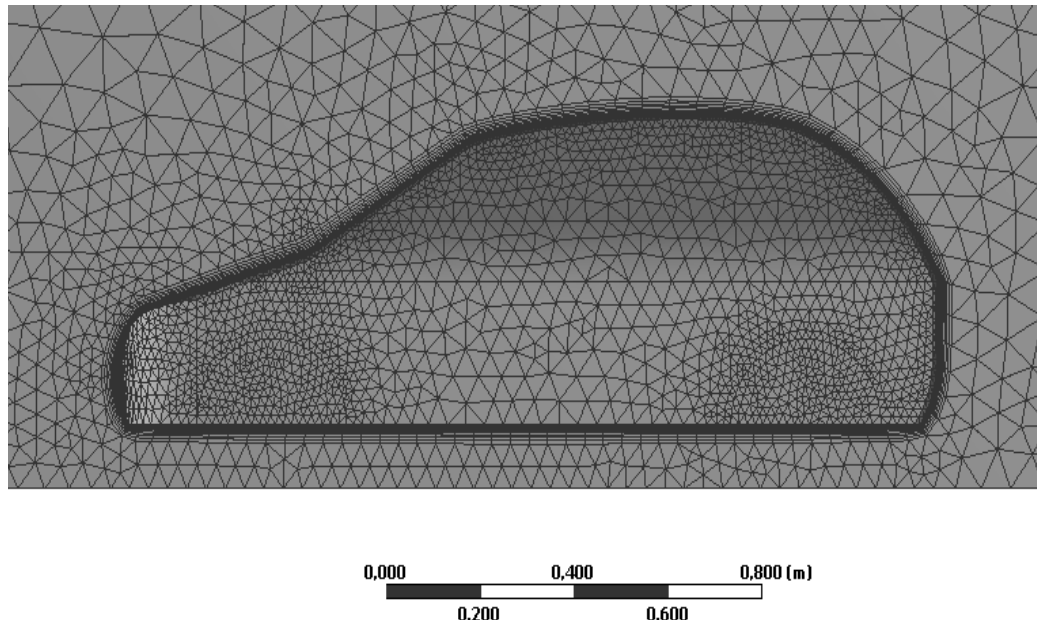


Fig. 5.6. Visualización del *inflation* alrededor del vehículo.

5.3.2. Optimización del dominio de control

En este apartado se estudia la posibilidad de reducir el dominio de control al máximo para agilizar el proceso de cálculo pero siempre con cuidado de no perder mucha información entre modificaciones. El dominio más grande (el inicial) es con el que se obtienen los mejores resultados, pero la limitación de la licencia de estudiante que fija el número máximo de elementos disponibles para el mallado, es necesario este proceso de optimización del dominio de control. Para llevar a cabo este proceso, se ha utilizado una malla genérica, con un gran número de elementos finitos, pero sin llegar al máximo permitido, que se optimizará en el siguiente apartado. Además se han hecho las simulaciones con las ruedas paradas para agilizar este proceso.

Para empezar los cálculos se parte de un dominio de control genérico por el que se suele empezar en estudios de automoción con las siguientes dimensiones:

- Longitud por delante del vehículo: $3 \times \text{Cuerda} = 5,25 \text{ m}$
- Longitud por detrás del vehículo: $5 \times \text{Cuerda} = 8,75 \text{ m}$
- Altura: $3 \times \text{Cuerda} = 5,25 \text{ m}$
- Ancho: $3 \times \text{Ancho del vehículo} = 1,75 \text{ m}$

Donde la cuerda del vehículo es de 1,75 m y el ancho del vehículo es de 0,4 m ya que se trabaja con medio coche debido a la simetría.

A continuación se realiza el mallado genérico del dominio de control, no extremadamente refinado para agilizar este proceso, con los parámetros siguientes:

- Transición lenta entre elementos.
- Min Size: $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
- Proximity Min Size: $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
- Max Face Size (Por defecto): 0,2 m
- Max Size (Por defecto): 0,2 m
- Minimum Edge Size (Por defecto): $1,56 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
- Growth Rate: 20%
- Número de elementos: 400.222
- Calidad de malla ortogonal: 79%
- Parámetro de calidad Skewness: 0,27

El parámetro de calidad ortogonal indica que una malla se considera buena cuanto más cerca esté el valor del 100%. Por otra parte, el parámetro Skewness indica que una malla se considera buena si su valor está entre el 0,25 y el 0,5. Valores inferiores de Skewness indican que la malla es excelente, en cambio, valores superiores indican que la malla es simplemente aceptable o mala. Para este trabajo,

dada la limitación de la licencia de la que se dispone, no se obtendrán valores de una malla excelente.

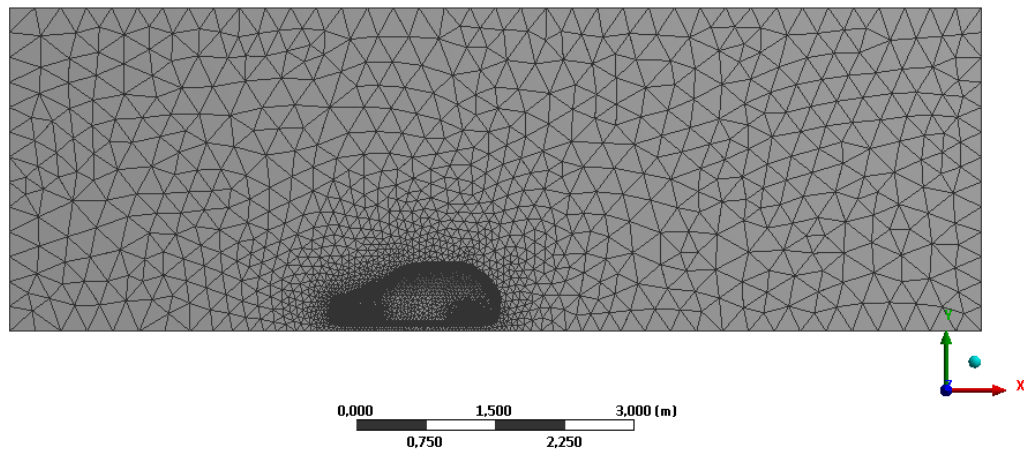


Fig. 5.7. Malla del dominio de control inicial.

Una vez creada la malla ya se pueden obtener y visualizar los resultados, de la siguiente fase de solución, conociendo que el área frontal del vehículo es de $0,2471 \text{ m}^2$ y con una velocidad de entrada de aire de 20 m/s .

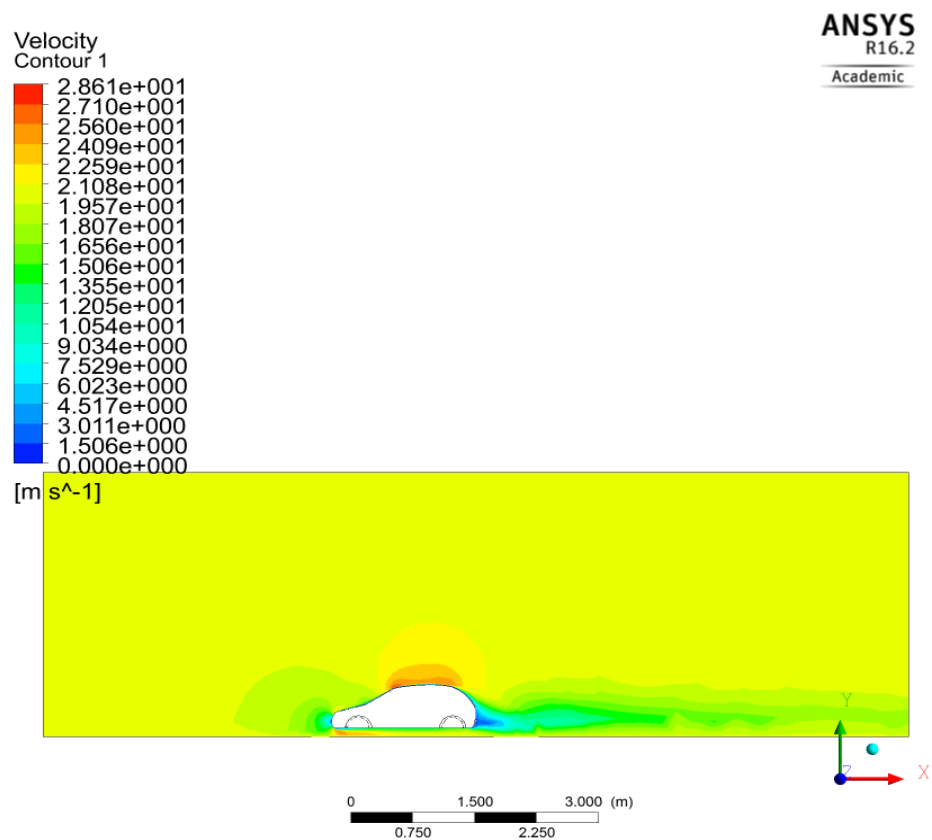


Fig. 5.8. Distribución de velocidades del dominio original en el plano de simetría.

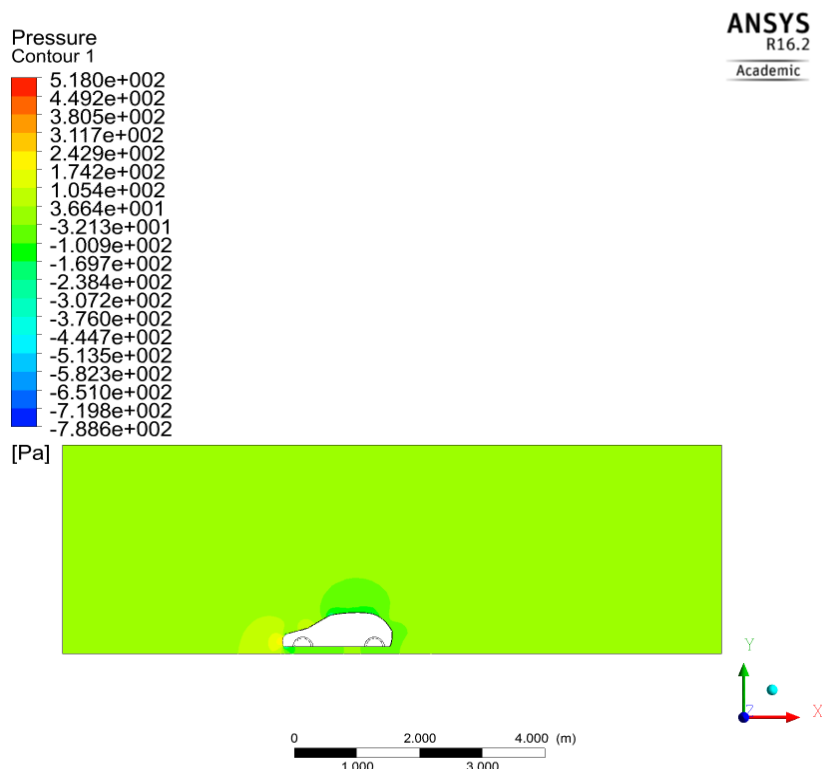


Fig. 5.9. Distribución de presiones del dominio original en el plano de simetría.

Como se puede observar en las Fig. 5.8 y Fig. 5.9, el dominio de control original se puede reducir considerablemente perdiendo muy poca información. A continuación se presenta una tabla comparativa del proceso seguido para la elección del dominio de control óptimo:

Simulación	H (x cuerda)	L1 (x cuerda)	L2 (x cuerda)	Z (x ancho)	C_D	C_L
1	2	2	3	3	0,40035	0,16586
2	1	1	2	2,5	0,44066	0,12995
3	1,5	0,75	2	2,5	0,4304	0,15116
4	1,5	0,75	2,5	2,5	0,42984	0,14976

Tabla 5.2. Obtención del dominio de control óptimo.

Una vez hechas las pruebas con diferentes dominios de control con las ruedas paradas y a velocidad de 20 m/s, se ha optado como dominio de control óptimo, el dominio número 4. Presenta los valores de C_D y C_L más cercanos al estudio inicial con unos errores del 7% y del 10% respectivamente y la visualización de resultados es correcta ya que no se observan errores como influencia de las paredes en el flujo de aire (Anexo A).

5.3.3. Optimización de la malla

Una vez obtenido el dominio de control óptimo el siguiente paso es mallar de la forma más fina posible y apurar al máximo el número de elementos que permite la licencia para garantizar la obtención de unos resultados fiables.

A partir de ahora, se aplicará rotación a las ruedas para tratar el caso real. Para cada caso, se aplicará la rotación a las ruedas necesaria para la velocidad de movimiento del coche.

Conocido el radio de las ruedas del vehículo ($r = 0,1375\text{m}$) y la fórmula $w = v / r$ para encontrar la velocidad de rotación, se calcula:

- $V = 20\text{m/s} \rightarrow w = 145,4545\text{rad/s}$
- $V = 35\text{m/s} \rightarrow w = 254,5454\text{rad/s}$
- $V = 50\text{m/s} \rightarrow w = 363,6363\text{rad/s}$

Se han hecho pruebas con dos mallas distintas con pequeñas diferencias para poder escoger la malla óptima. A continuación se presentan los parámetros más representativos de las mallas:

	Original	Malla 1	Malla 2
Min Size (m)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Proximity Min Size (m)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
Max Face Size (m)	0,2	0,2	0,2
Max Size (m)	0,2	0,2	0,2
Minimum Edge Size (m)	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$
Growth Rate	20%	12%	20%
Número de elementos	399.278	469.326	473.171
Calidad de malla ortogonal	0,808	0,808	0,796
Skewness	0,255	0,255	0,262

Tabla 5.3. Comparativa de los parámetros de las mallas propuestas.

A continuación se puede ver una tabla comparativa de los resultados obtenidos con las dos mallas propuestas:

Mallat	Cd	Cl	P max (Pa)	V max (m/s)
Original	0,42984	0,14976	267,8	30,94
1	0,40538	0,1196	267,6	32,09
2	0,4107	0,1393	268	31,88

Tabla 5.4. Comparativa de los resultados con las mallas óptimas.

Finalmente se escoge la malla óptima número 1 ya que se obtiene tanto un coeficiente de *drag* como de *lift* inferiores a la malla 2 y a la original como se observa en la *Tabla 5.4*. Esta malla presenta unos valores mínimos de tamaño de elementos finitos un poco superiores a la malla 2 pero un índice de crecimiento mucho menor, esto provoca una mayor densidad de elementos pequeños alrededor del vehículo que permite obtener y visualizar mejor los resultados de fenómenos como la estela que se produce muy cerca del vehículo.

5.4. Obtención y visualización de resultados

5.4.1. Obtención de resultados

El primer paso en el proceso de solución es definir el modelo de solución. El modelo más sencillo y más usado en este tipo de análisis turbulentos, es el modelo κ -epsilon ($\kappa - \varepsilon$) ya que es el más sencillo de usar y se obtienen buenos resultados. Presenta dos ecuaciones que representan las condiciones turbulentas del flujo. La primera variable se denomina *Energía Cinética Turbulenta* o κ (TKE por sus siglas en inglés) y determina la energía en la turbulencia. La segunda variable se denomina *Disipación Turbulenta* o ε y determina el ratio de disipación de la energía cinética turbulenta. Como parte negativa, este modelo de turbulencia tiene problemas para calcular la solución en problemas de flujo con separación de capa límite y superficies curvas.

Para evitar o minimizar estos problemas, se ha seleccionado la opción *Coupled* en lugar de *Simple* en el apartado de método de solución. Este método alarga un poco el tiempo de simulación, pero presenta más facilidades para lograr la convergencia para estudios tridimensionales y el análisis de resultados es más sencillo. Además

se ha impuesto que las ecuaciones de momento, energía cinética turbulenta y disipación turbulenta se traten con Second Order Upwind (ecuaciones de segundo grado) ya que se obtienen resultados más precisos que con First Order Upwind para simulaciones tridimensionales.

El siguiente paso consiste en definir las condiciones de contorno del dominio de control:

- *Inlet*: Se impone la velocidad de entrada del flujo de aire en la pared de entrada. En este caso se realizara el estudio con tres velocidades diferentes: 20, 35 y 50 m/s.
- *Outlet*: Pared posterior por donde sale el flujo. Se puede imponer una presión de salida, definir una intensidad turbulenta de reflujo o un ratio de viscosidad turbulenta de reflujo.
- *Symmetry*: A causa de la simetría del vehículo, se trabaja solo con la mitad. Así también reducimos el dominio de control y en consecuencia, el número de elementos finitos.
- El resto de paredes del cubo son paredes de contorno por donde el flujo no puede escapar. En estas paredes se impondrá la misma velocidad que se imponga en la entrada que representa la V_{∞} del fluido.
- En las superficies del vehículo se impondrá la condición de no deslizamiento.

Para encontrar la solución al problema, se impone como condición de los residuos, que la convergencia no se ha encontrado hasta obtener un error inferior a 10^{-4} como se observa en la Fig. 5.10, hasta que se alcanza el número máximo de iteraciones, que se ha fijado a 1000, o hasta que se para manualmente la simulación por motivo de oscilaciones en el valor de los residuos, solo si estos han alcanzado un valor próximo a 10^{-4} como puede verse en la Fig. 5.11.

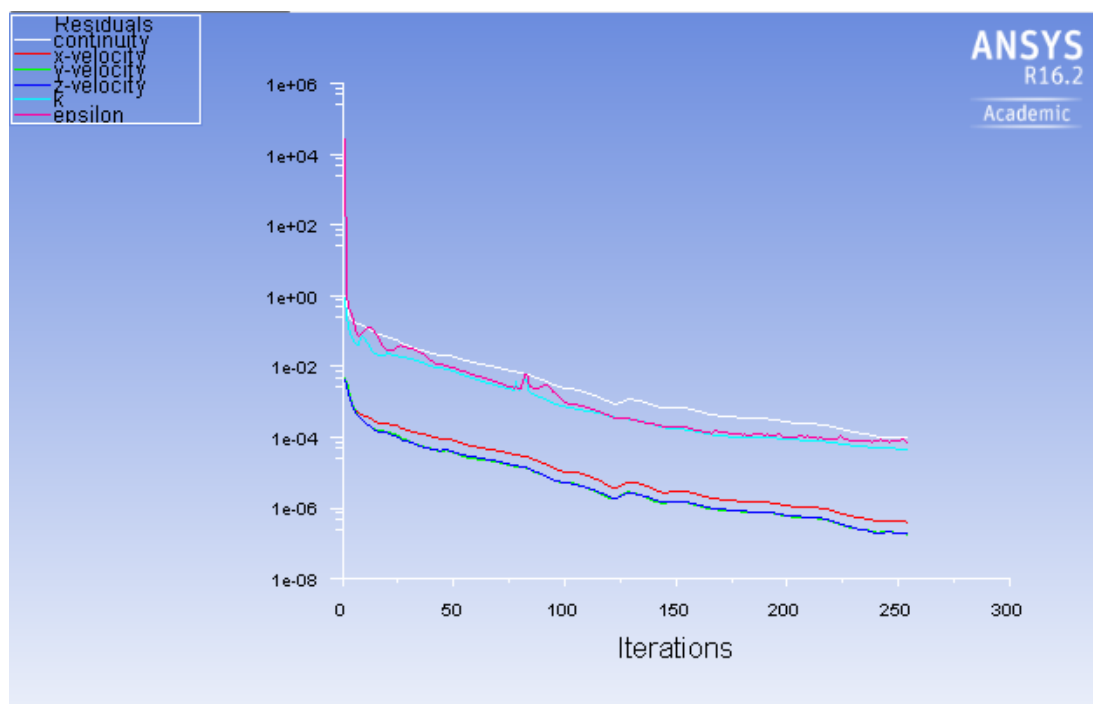


Fig. 5.10. Representación de los residuos con buena convergencia.

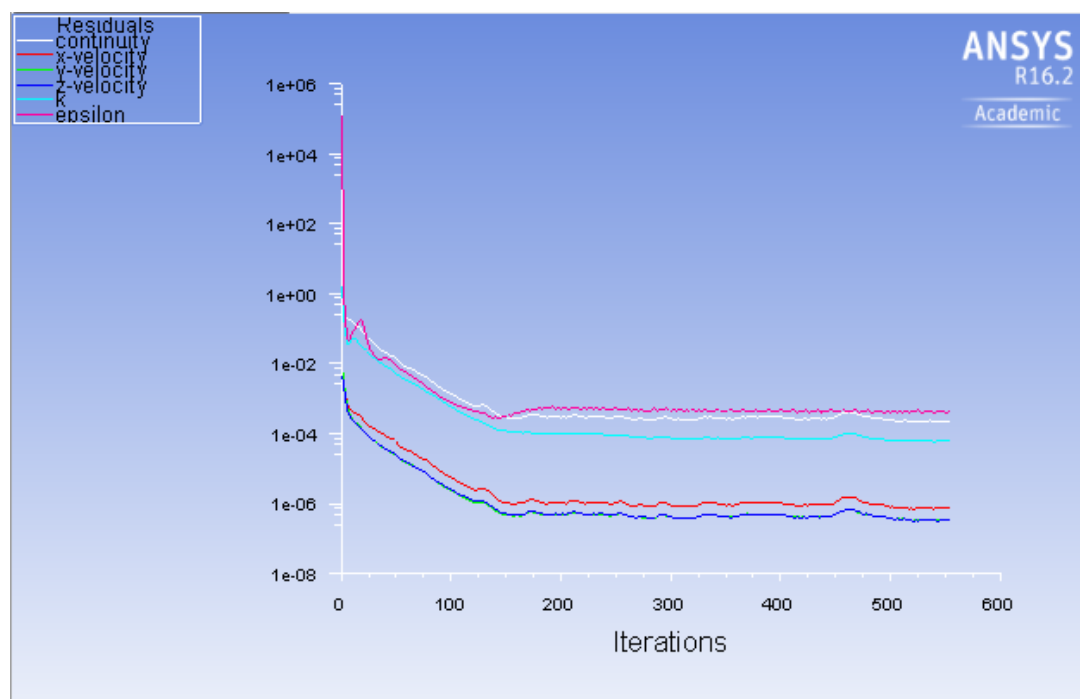


Fig. 5.11. Representación de los residuos con una convergencia no muy buena.

Durante el proceso de cálculo, además de los residuos, se han monitorizado los valores del coeficiente de resistencia al avance (c_D), del coeficiente de sustentación (c_L), y del coeficiente de momento (c_M).

En un caso real, la presencia de oscilaciones en los residuos, o en alguno de los coeficientes monitorizados indicaría que la solución no es del todo correcta, que se podría aproximar más en caso hacer un mallado más refinado.

Recordar que durante la etapa de post-proceso, se lleva a cabo el proceso de análisis de resultados, que consiste en interpretar si los resultados obtenidos de las simulaciones son correctos comparándolos con resultados experimentales. La obtención de resultados en automoción de análisis en circuitos o de túnel de viento es complicado debido a la confidencialidad de las marcas o escuderías para conservar la competencia, así que han usado valores tabulados aproximados. La elección de las diferentes velocidades, consiste en una velocidad que representa la circulación por carretera normal (20 m/s), la velocidad máxima alcanzable en las carreteras españolas (35 m/s) y la máxima velocidad alcanzable por el vehículo (50 m/s).

Finalmente se obtienen los siguientes resultados:

Magnitud	V = 20 m/s	V = 35 m/s	V = 50 m/s
C_D	0,4054	0,4059	0,4069
C_L	0,1196	0,1232	0,1252
$C_D \cdot Af$	0,1024	0,1026	0,1028
$C_L \cdot Af$	0,0302	0,0311	0,0316
C_M	0,1957	0,1968	0,1980
C_L/C_D	0,2950	0,3036	0,3077
F_D [N]	24,5874	75,3896	154,2354
F_L [N]	7,2540	22,8825	47,4571
M [N·m]	20,7688	63,9670	131,3408

Tabla 5.5. Resultados del modelo de serie.

Con los resultados obtenidos se puede afirmar que las simulaciones y las aproximaciones hechas para llevarlas a cabo, son correctas. Se obtienen valores de C_D que se encuentran dentro del intervalo para turismos convencionales (0,25 – 0,45) [2]. En el caso del C_L también obtenemos unos valores previstos que cumplen dentro del intervalo de turismos de este estilo (0 – 0,3) [3].

En cuanto al valor del momento de cabeceo, el alcance del proyecto no abarca el estudio dinámico de la fuerzas ni la mejora del momento de cabeceo, debido a que la geometría del vehículo está diseñada manualmente y no se contempla la

modificación y el estudio de la geometría en la mejora aerodinámica. Se incluye el valor para tener una idea de la variación que sufre al variar las velocidades de estudio y, posteriormente, al añadir apéndices aerodinámicos.

Se puede observar en la Tabla 5.5 como al aumentar la velocidad del fluido, el valor del C_L tiende a aumentar. Valor previsto ya que al ser la velocidad del fluido mayor, este ejerce una fuerza mucho mayor sobre el vehículo, donde si se siguiese aumentado la velocidad, el coche podría levantarse del suelo al ser la fuerza de *lift* mayor que la fuerza que se opone, que es el peso. Por este motivo es por el que la aerodinámica es muy importante cuando se trabaja a velocidades elevadas. En cambio, el *drag* se mantiene prácticamente constante al variar de velocidad, esto supone que la separación de capa límite y la viscosidad son prácticamente la misma para las diferentes velocidades. En un caso real trabajando con un modelo a escala real, la variación del *drag* sería mayor.

5.4.2. Introducción de planos de visualización de resultados

Plano de simetría de las ruedas

Es un plano de especial interés ya que permite ver tanto el punto de estancamiento de las ruedas como su estela generada. Es un plano paralelo al plano de simetría que pasa por el medio de las ruedas.

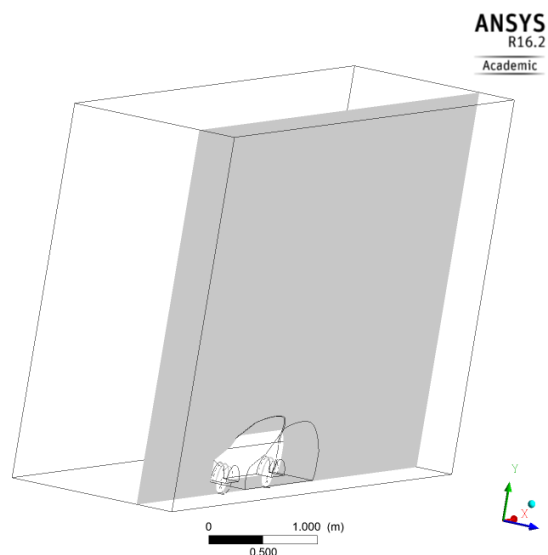


Fig. 5.12. Plano de simetría de las ruedas.

Planos transversales

El plano de las ruedas delantera y trasera y el plano de visualización de los laterales, son planos en la dirección transversal a la dirección del flujo de aire. El plano más importante a comentar es el plano de visualización de los laterales, que es un plano que se encuentra localizado en el centro del vehículo y se utiliza para ver la interacción que se produce entre el aire que circula por los laterales del vehículo, con el aire que circula por el fondo del coche. Debido a la diferencia de presiones que existe entre el aire que circula por los laterales del vehículo y el aire que circula por el fondo del coche, el aire del fondo tiende a escapar por los laterales. Se verá y se explicará este fenómeno más adelante.

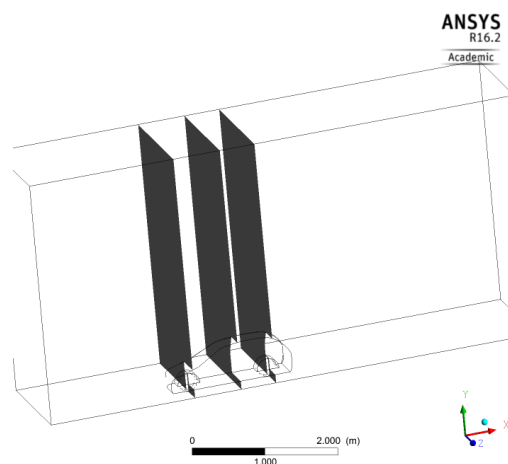


Fig. 5.13. Planos de las ruedas y d visualización de los laterales.

Planos de turbulencia

Se han ubicado cuatro planos en la parte posterior al vehículo en la dirección transversal a la dirección del flujo. Sirven para visualizar la estela que se genera en la parte posterior del vehículo y se espera observar la aparición de grandes vórtices (remolinos) de flujo y grandes variaciones de velocidad en todas direcciones provocado por la turbulencia de la separación de capa límite en la parte posterior del vehículo. El primero de los planos se ha colocado a una distancia de tan solo 0,25 m de la parte posterior del vehículo. El resto de planos se ha colocado a un metro de distancia entre ellos respectivamente.

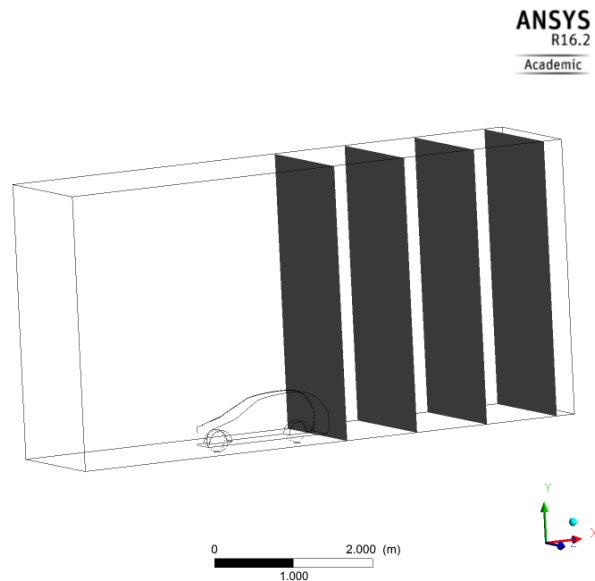


Fig. 5.14. Planos de turbulencia.

5.4.3. Visualización de resultados

Para reducir el número de figuras, se explica solo la visualización de resultados de la simulación a 35 m/s, que correspondería a 126 Km/h, velocidad cercana a la máxima permitida en las carreteras españolas. Figuras complementarias a las usadas y las figuras correspondientes a las otras velocidades se pueden ver en el anexo B.

Distribución de presiones

Tal y como era de esperar, como se observa en la Fig. 5.15, en el morro del vehículo esta presente el punto de estancamiento principal del vehículo, debido a que es prácticamente transversal al flujo de aire y de gran tamaño. También son destacables otros puntos de estancamiento como la intersección del capo con el parabrisas delantero (Fig. 5.15) donde existe un cambio brusco de dirección que obliga al fluido a acelerarse. Además también tener en cuenta, los puntos de estancamiento de las ruedas, más pronunciado en la rueda delantera que en la posterior. Estos puntos de estancamiento en las ruedas se encuentran un poco desplazados hacia abajo y no el punto más adelantado, debido a la rotación de las ruedas, como se observa en las siguientes figuras: Fig. 5.15 y Fig. 5.16.

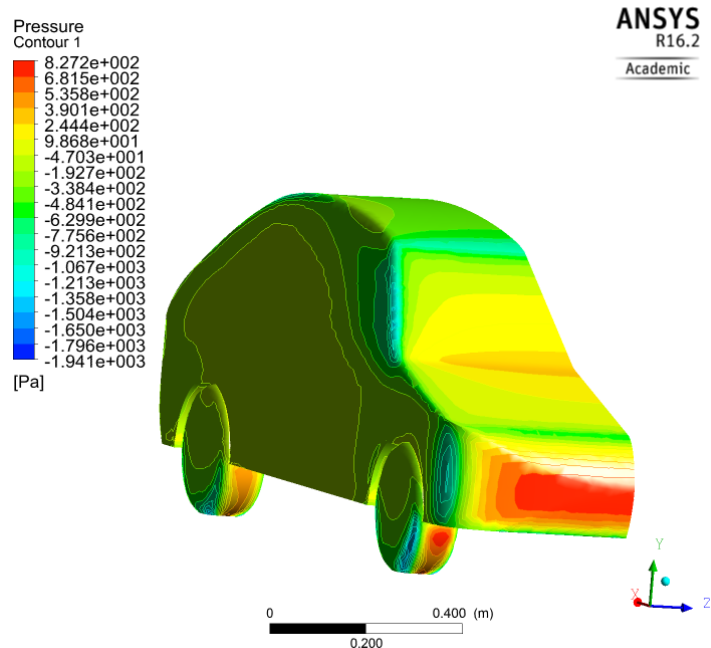


Fig. 5.15. Distribución de presiones en la superficie del vehículo.

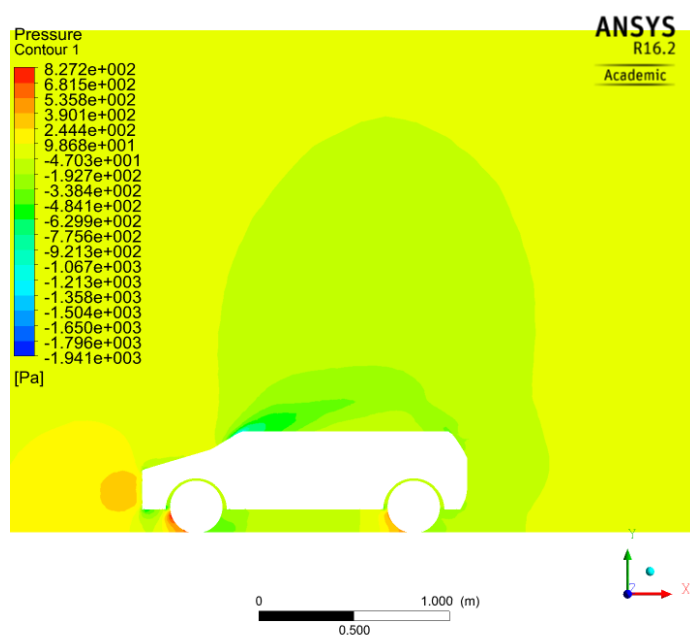


Fig. 5.16. Distribución de presiones en el plano de perfil de las ruedas.

Distribución de velocidades

La representación de velocidades es prácticamente inversa a la distribución de presiones. Donde antes se encontraba el punto de estancamiento con la presión máxima, ahora se encuentra el punto de velocidad mínima. Los puntos de velocidad máxima se encuentran en zonas donde el área transversal del flujo se estrecha y en zonas donde el flujo debe rotar o cambiar de dirección. En la Fig. 5.15 se observa como los puntos de mínima presión se encuentran en la zona de unión del parabrisas con el techo, y en la unión de la parte frontal del vehículo, con la parte lateral. Se comprueba este hecho observando las distribuciones de velocidades en las siguientes figuras: Fig. 5.17 y Fig. 5.18 y Fig. 5.19. Adicionalmente, en estas figuras se puede observar el desprendimiento de capa límite tanto en la parte posterior del vehículo, como en la parte posterior de las ruedas.

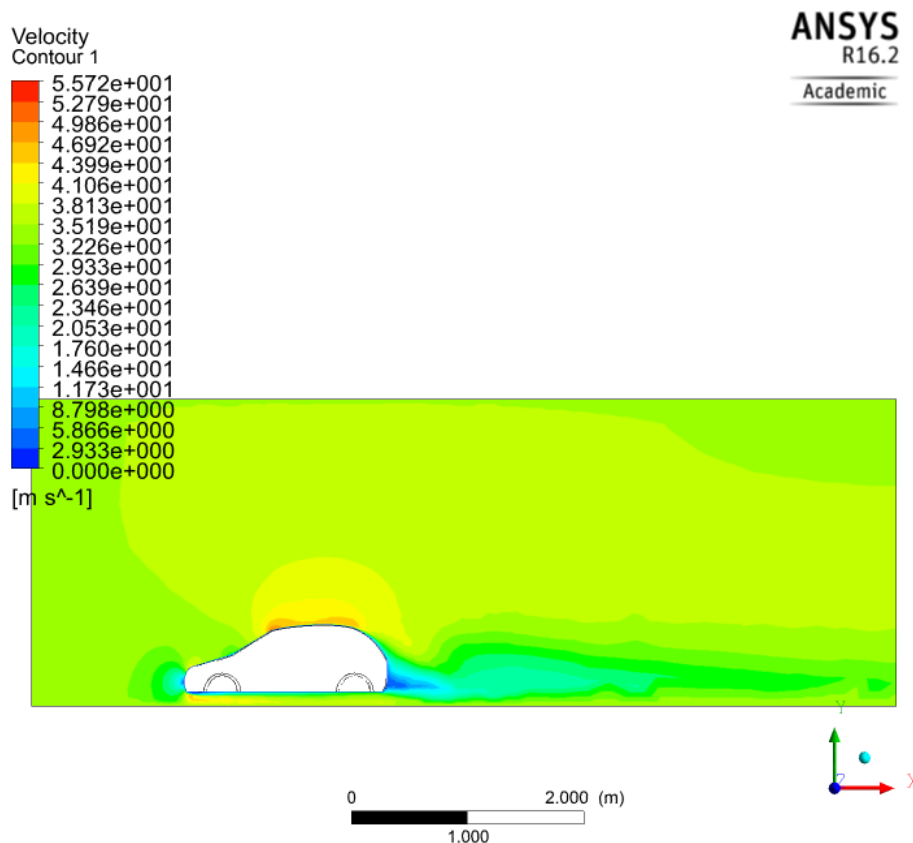


Fig. 5.17. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

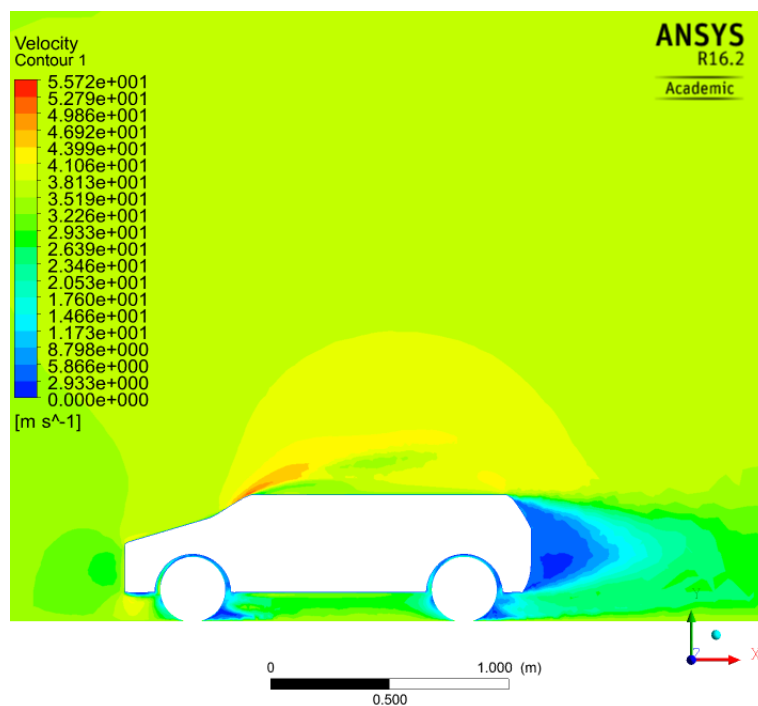


Fig. 5.18. Detalle de la distribución de velocidades en el plano de perfil de las ruedas.

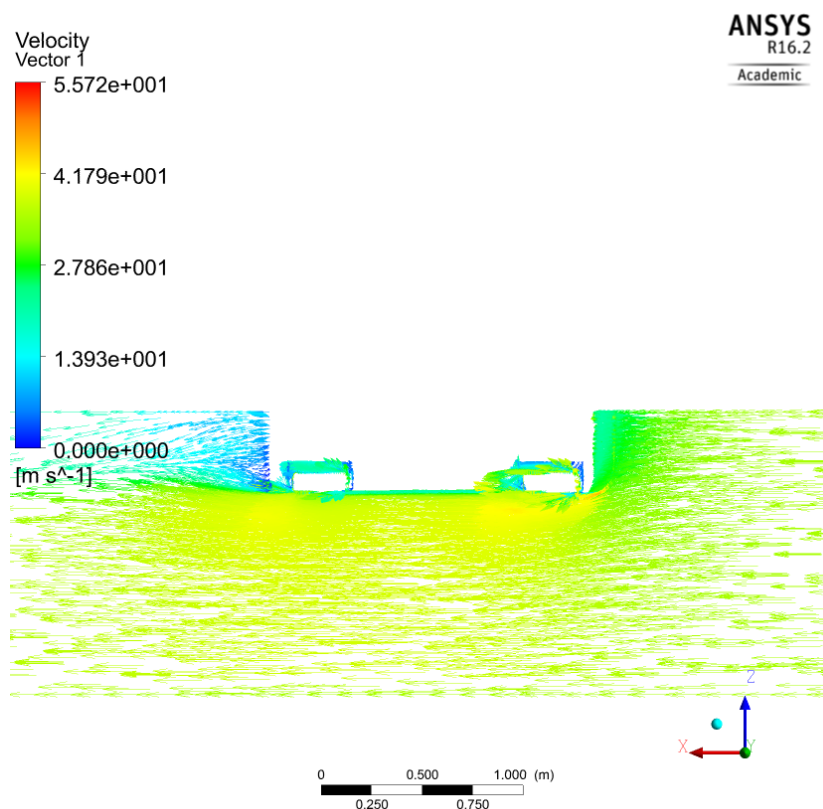


Fig. 5.19. Distribución de velocidades en forma de vector visto en planta.

Estudio de los laterales

Con la ayuda del plano comentado anteriormente (Fig. 5.13), se puede observar un fenómeno muy importante que se produce en un vehículo, como es la interacción del aire que circula por el fondo del coche con el aire que circula por los laterales del vehículo, y además, en unas condiciones similares, de la interacción del aire que circula por la parte superior del vehículo, con el que circula por los laterales. La diferencia de presiones entre ambas zonas, provoca la aparición de pequeños vórtices (remolinos marginales) como se puede observar en la

El aire que circula por el fondo del vehículo, tiende a escaparse por los laterales debido a que se encuentra a una presión mayor que en el exterior.

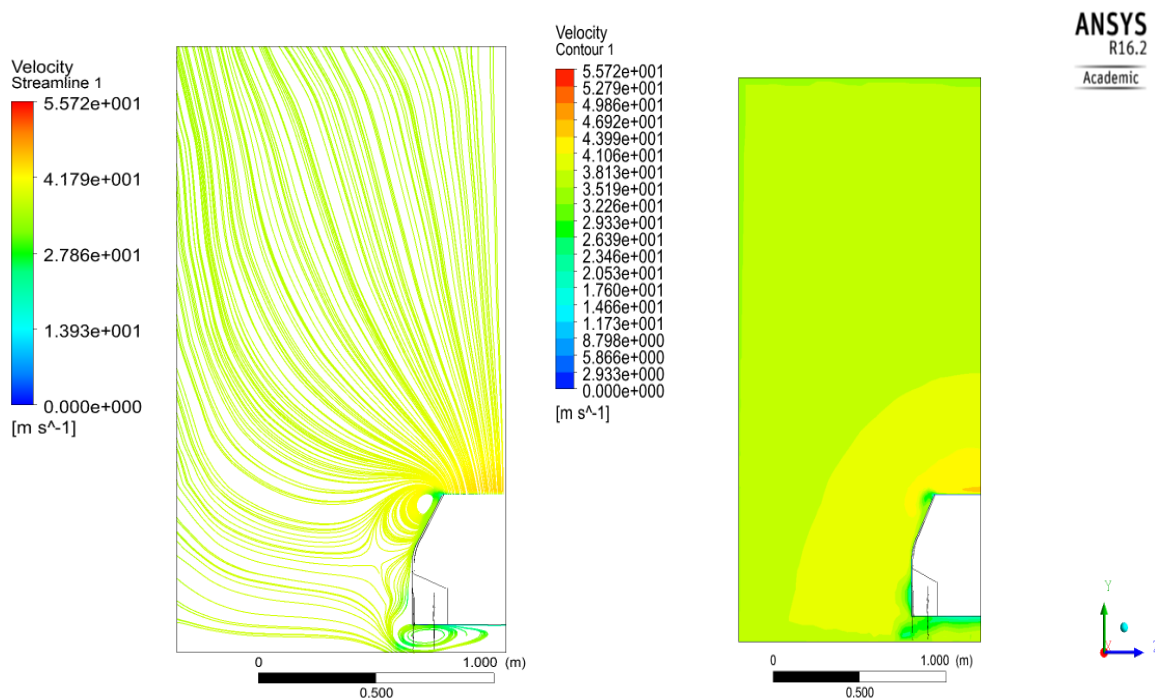


Fig. 5.20. Visualización de remolinos marginales en los laterales del vehículo.

Estudio de la estela

La estela que se genera en un vehículo es la mayor causante del *Drag* total del vehículo y objeto muy importante del estudio aerodinámico de turismos. Las estelas que se generan en la parte posterior del vehículo y en la parte posterior de las ruedas son las causantes del *drag* de presión por la separación de capa límite que se produce. La aparición de la estela viene marcada sobretodo por la forma del modelo, cuanto más puntiaguda sea la forma posterior del vehículo o más suave

sea el final del vehículo, más tarde se producirá la separación de capa límite y menor estela se generará, y por tanto, se reduciría el coeficiente de *drag*.

En este caso, la forma posterior del vehículo es un poco redondeada, de esta forma, como se observa en la Fig. 5.21, el desprendimiento de capa límite se encuentra muy retrasado y la estela no es de grandes dimensiones.

En la estela generada por cualquier elemento aerodinámico, se observa que el flujo es muy turbulento, varia mucho de dirección y sentido y es muy difícil de predecir y calcular lo que pasa en esta zona. Por esta razón, se ha decidido mallar de forma más fina las zonas cercanas al vehículo para visualizar mejor los resultados y se han utilizado diferentes figuras en diferentes perspectivas para su visualización.

En la Fig. 5.21 y en la Fig. 5.22 se puede observar la estela generada en la parte posterior del vehículo y en la parte posterior de la rueda trasera, donde se observa como en la distribución de los vectores en la estela, estos van en todas direcciones y de muy diferente magnitud.

En la siguientes figuras (Fig. 5.23 y Fig. 5.24) se puede observar la generación de los vórtices en la parte posterior del vehículo en los planos de visualización de turbulencia (Fig. 5.14). Se observa como en el primer plano, el más cercano al coche, a una distancia de 0,25 m, ya se ha empezado a generar el vórtice. En los siguiente planos, se observa como a medida que el fluido se va alejando del vehículo, el vórtice va aumentado de tamaño, pero de menor intensidad. Si continuara el estudio aguas más abajo, el vórtice terminaría por desaparecer.

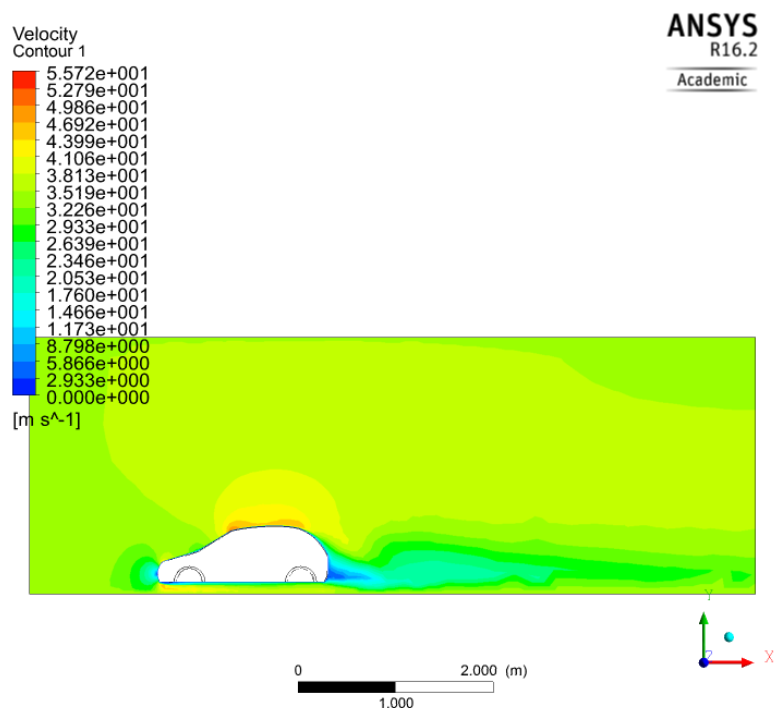


Fig. 5.21. Visualización de la estela formada en el plano de simetría.

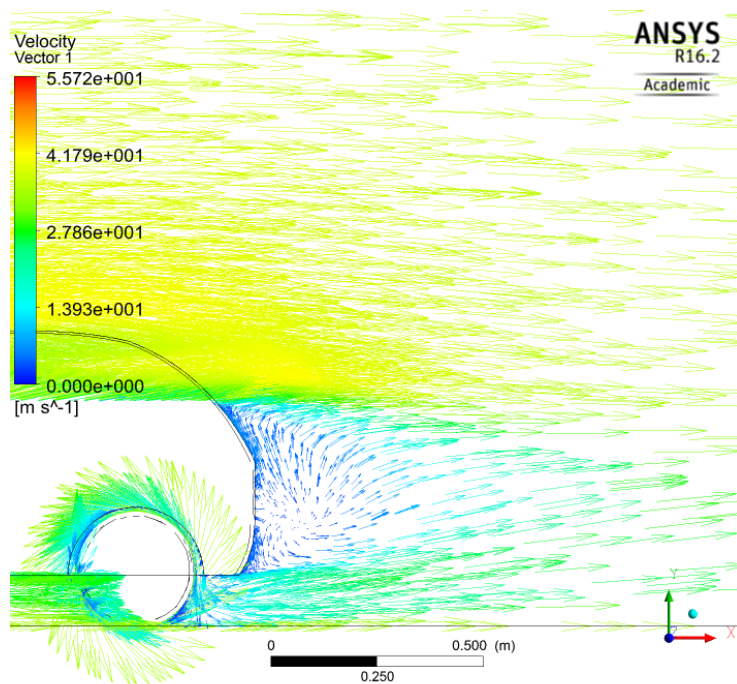


Fig. 5.22. Visualización de la estela en forma de vectores en el plano de perfil de las ruedas.

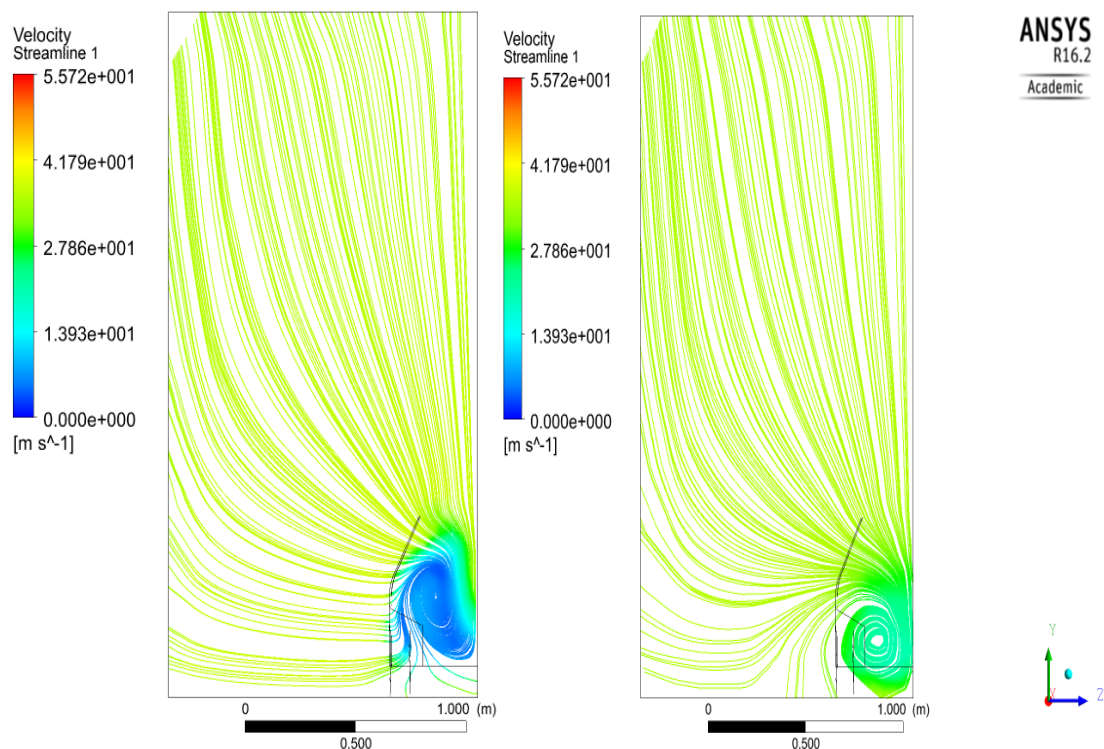


Fig. 5.23. Visualización de la turbulencia en los planos 1 y 2.

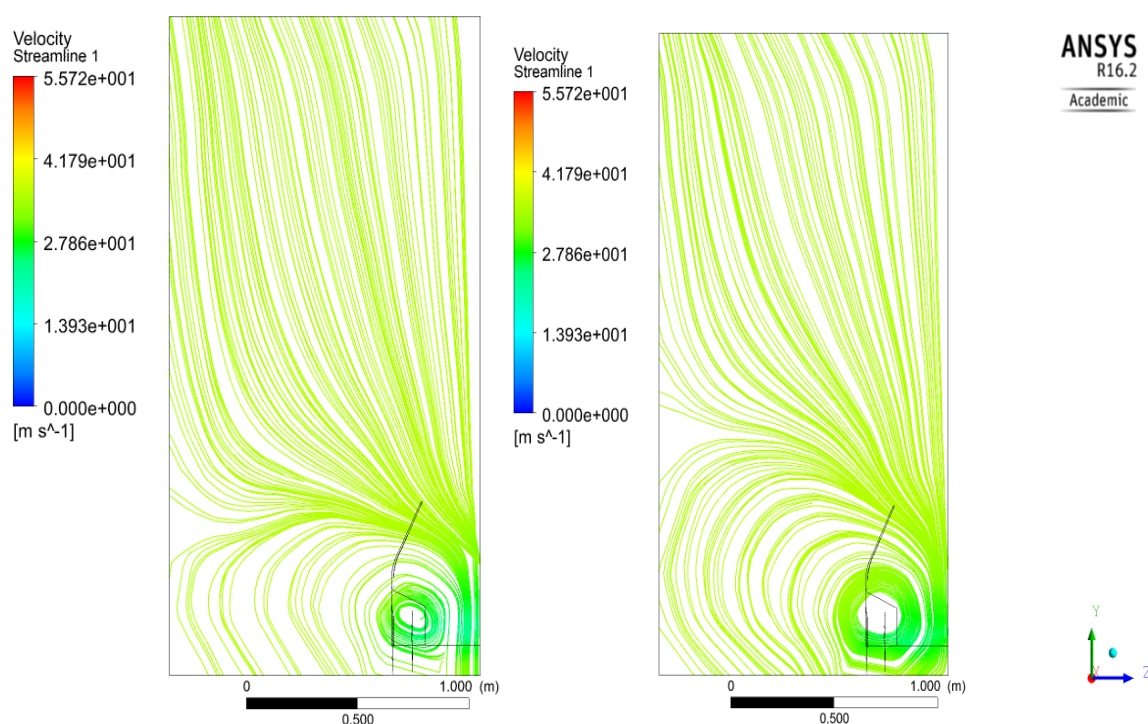


Fig. 5.24. Visualización de la turbulencia en los planos 3 y 4.

Se puede comprobar que la turbulencia generada se corresponde con un modelo teórico de características semejantes:

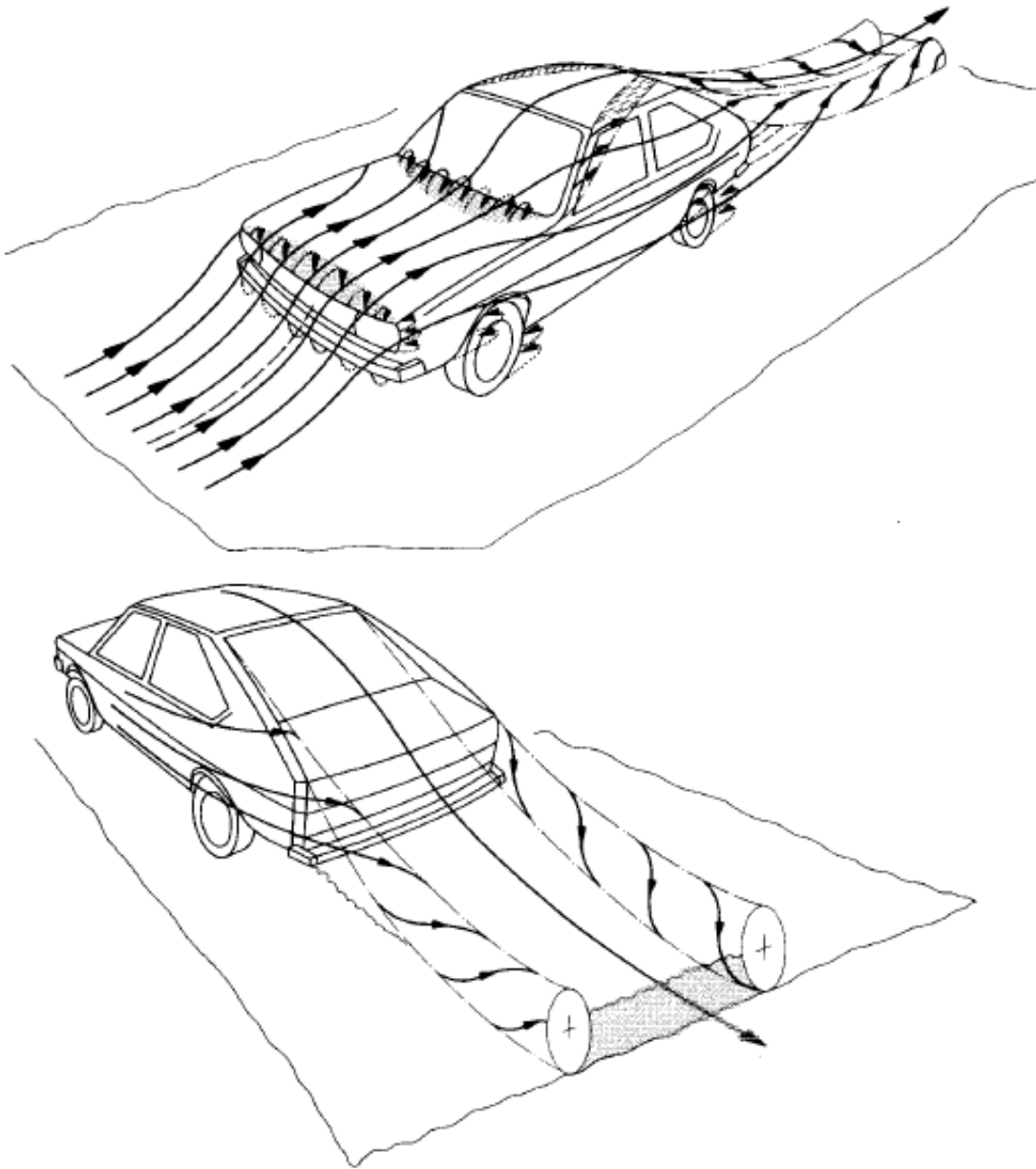


Fig. 5.25. Visualización de la turbulencia de un modelo teórico semejante.

Estudio de las ruedas

Las ruedas en un vehículo tienen una gran influencia en la aerodinámica. Para tener una idea, en algunos coches, esta influencia es capaz de generar el 50% de la resistencia al avance total y el 80% de la resistencia de sustentación [4].

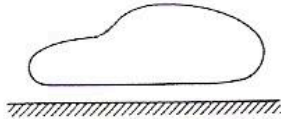
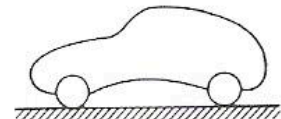
	C_D	C_L	A in m^2 M 1:2
	0.073	-0.044	0.407
	0.157	-0.009	0.462

Fig. 5.26. Impacto de las ruedas en la aerodinámica de un turismo.

El flujo alrededor de las ruedas es muy complicado. Las ruedas giran y generan tanto un coeficiente de resistencia al avance como de sustentación, no son cuerpos muy aerodinámicos. Para el caso de las ruedas de un turismo, el flujo a su alrededor queda como se observa en la Fig. 5.27. Si se quisiera reducir el *drag* por presión que se genera por el desprendimiento de capa límite en la parte posterior de las ruedas, lo que se debe hacer es reducir el flujo de aire entre el pasa-ruedas, reducir el área de paso entre las ruedas y el chasis del coche.

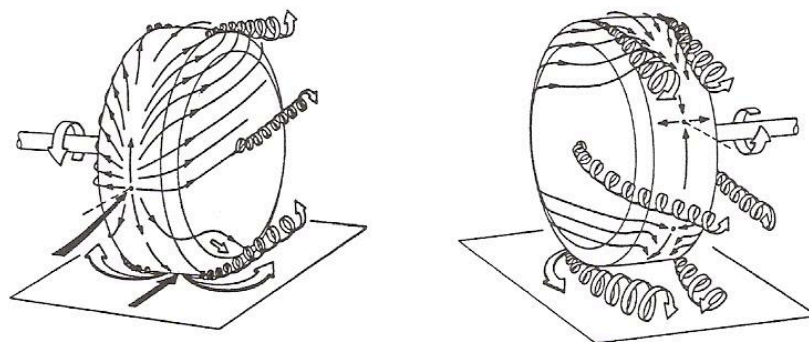


Fig. 5.27. Flujo alrededor de una rueda en movimiento.[5]

6. Mejoras aerodinámicas

Como se ha comentado anteriormente, los objetivos del trabajo son comprender el comportamiento del flujo de aire alrededor de un turismo cuando este se encuentra en movimiento estacionario, hacer el estudio de posibles mejoras que se podrían aplicar y como afectan estas mejoras al comportamiento del flujo de aire. Además comentar que no se contempla la modificación de la geometría inicial del vehículo, sino que solo se centra en la adición de apéndices aerodinámicos.

A continuación se explican algunos de los diferentes apéndices aerodinámicos que se pueden añadir a un turismo, su funcionamiento, sus ventajas y desventajas y como afectan al flujo de aire. Estas modificaciones se han ido aplicando una a una, haciendo cada vez una comparativa de los resultados obtenidos de la simulación, con el modelo inicial (de serie). El proceso de adición de las mejoras es en el sentido del flujo, es decir, se empieza por la parte delantera del vehículo, de tal forma que las modificaciones afectarán al fluido aguas abajo, en cambio, el flujo aguas arriba se mantiene constante.

Todas las simulaciones llevadas a cabo han seguido el mismo procedimiento descrito en el capítulo 5, ya con el dominio de control y la malla óptimos. Además, la velocidad de simulación en el proceso de adición de mejoras es de 20 m/s.

6.1. Spoiler delantero

La primera zona de estudio es la parte delantera, donde el fluido se encuentra con el coche y se crea el primero y más importante punto de estancamiento. Aquí el fluido se separa y fluye hacia la parte superior, la parte inferior y hacia los laterales del coche. Este estudio es de gran importancia debido a que el fluido llega sin alteraciones y las modificaciones que se añadan, marcarán como seguirá el fluido su curso aguas abajo.

El spoiler delantero, también denominado faldón o mandíbula, es un trozo de panel casi vertical como se observa en la Fig. 6.1. La finalidad del spoiler delantero es reducir el espacio entre el vehículo y el suelo, lo que provoca un aumento de la presión en esta zona, y con ello, un aumento de la sustentación negativa, debido a la generación de una pequeña estela en la parte posterior del spoiler. Este efecto provoca que el aire del exterior, al estar a presión más baja, querrá mezclarse con el

aire del fondo del coche, por eso la adición de un spoiler delantero suele ir acompañada con la adición de faldones laterales, que se explica más adelante, para favorecer el efecto suelo y sellar el fondo. Además se puede conseguir una reducción del *drag*, consiguiendo que circule menos aire por la parte inferior del vehículo, y así reducir el rozamiento del fluido con elementos rugosos como son el cárter, la caja de cambios, ruedas, tubos de escape... Como se ha comentado anteriormente, para la simplificación de la geometría, se trabaja con un fondo liso, de esta forma, la posibilidad de reducir el *drag* queda limitada a la menor circulación de aire por las ruedas.

Tener en cuenta que la adición del spoiler delantero genera un aumento del área frontal que puede provocar un aumento del coeficiente de resistencia al avance. Por lo tanto, cuanto más cerca del suelo esté el spoiler delantero, más se reduce el *lift*, pero más aumenta el área frontal. Otro hecho a tener en cuenta, es que la modificación de la parte delantera, modificará la parte trasera. La adición de carga aerodinámica en la parte delantera generando muy buen agarre de las ruedas delanteras puede provocar por el contrario, por efecto palanca, que las ruedas traseras pierdan adherencia, o que el flujo que llega en estas condiciones, empeore la sustentación.

Además del faldón delantero, se añade un divisor de flujo (splitter). Consiste en fijar una placa plana paralela al suelo con el fin de que la alta presión incida sobre la placa, y la empuje hacia abajo, creando así carga aerodinámica. El objetivo es restringir la cantidad de aire que circula por la parte inferior del coche. Con este apéndice se consigue el mismo efecto que con un faldón más profundo, aumentando en menor medida el área frontal. La cantidad de carga aerodinámica se controla, en este caso, con la longitud de la placa plana.

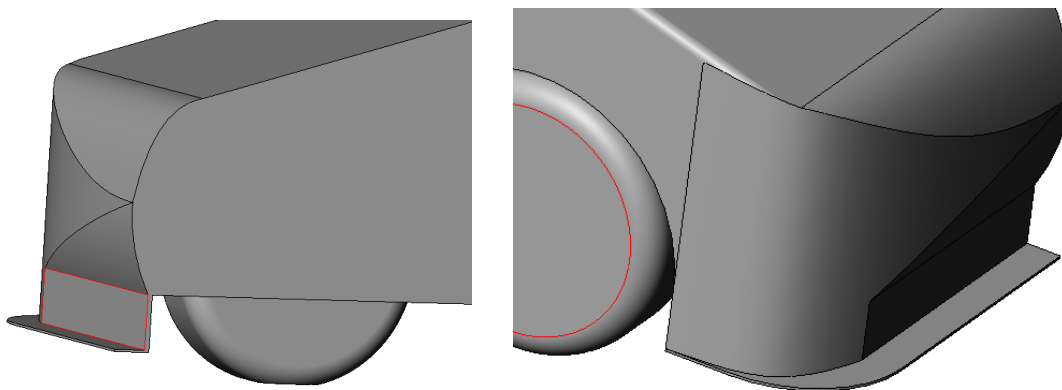


Fig. 6.1. Spoiler delantero.

En definitiva, se ha utilizado un faldón delantero que reduce aproximadamente un tercio de la altura del vehículo (45mm) y un *front splitter* que sobresale hasta el extremo del morro (35mm) y de un espesor muy reducido (5mm).

En la *Tabla 6.1* se observan los resultados obtenidos de la simulación con esta primera mejora aerodinámica aplicada. El área proyectada frontal ahora pasa de 0,2527 m² a ser de 0,2718 m².

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4054	0,1196	0,1957	0,295	0,1024	0,0302	24,5874	7,254	20,7688
Modificación	0,4181	0,0585	0,1985	0,1399	0,1136	0,0159	27,2757	3,8164	22,6618
Variación	3,13%	-51,09%	1,43%	-52,57%	10,94%	-47,35%	10,93%	-47,39%	9,12%

Tabla 6.1. Resultados de la primera modificación.

Analizando los resultados se puede observar como con la adición del spoiler delantero se consigue reducir drásticamente la sustentación, una reducción del 50% aproximadamente, aunque a pesar de ello, se sigue obteniendo un valor positivo. Se puede apreciar como, por el contrario, el valor del coeficiente de resistencia al avance ha aumentado. Este hecho es debido al aumento de área frontal, como se ha comentado anteriormente, para crear el efecto suelo sellando el fondo del coche y reduciendo la altura, se suele combinar la adición del spoiler delantero y de faldones laterales. Para observar mejor los resultados y como influye en estos el área frontal, se utilizan los valores de $C_D \cdot A_f$ y de $C_L \cdot A_f$.

Se puede observar que los resultados obtenidos son correctos, comparándolos con los resultados obtenidos de un estudio con un turismo convencional sometido a condiciones semejantes. En el estudio, el turismo presenta un área frontal de 2,32 m², circula a 160 Km/h y se le ha añadido un spoiler delantero de altura 90 mm (aproximadamente una reducción de un tercio de la altura respecto del suelo). En este vehículo se produce una reducción del lift de 0,21 [6]. Además se puede comprobar en la siguiente figura (*Fig. 6.2*) la influencia que tiene un spoiler delantero en el coeficiente de resistencia al avance y como afecta a la sustentación de los ejes delantero y posterior [7].

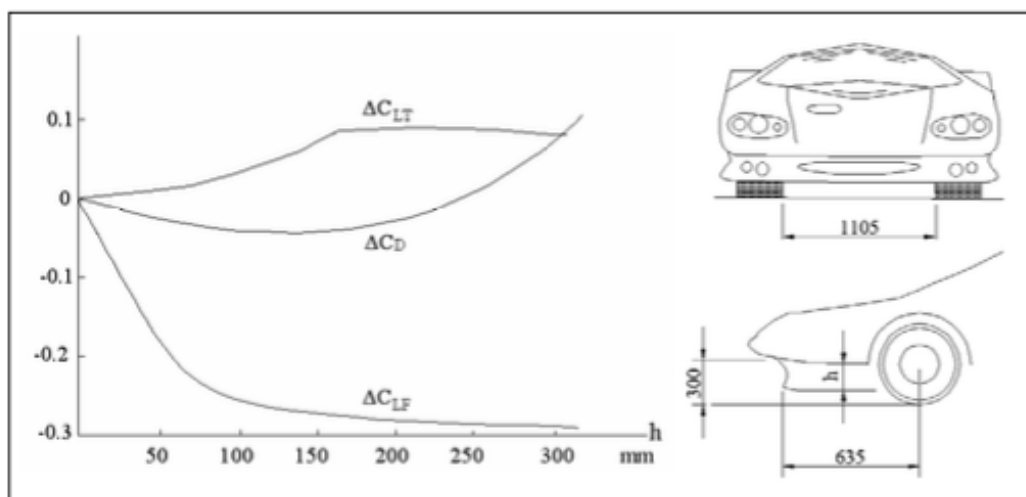


Fig. 6.2. Coeficientes C_D , C_{LF} , C_{LT} , en función de la altura del spoiler delantero.

En las figuras siguientes se puede observar mediante la distribución de presiones y de velocidades, como afecta la adición del spoiler delantero al flujo de aire alrededor del vehículo.

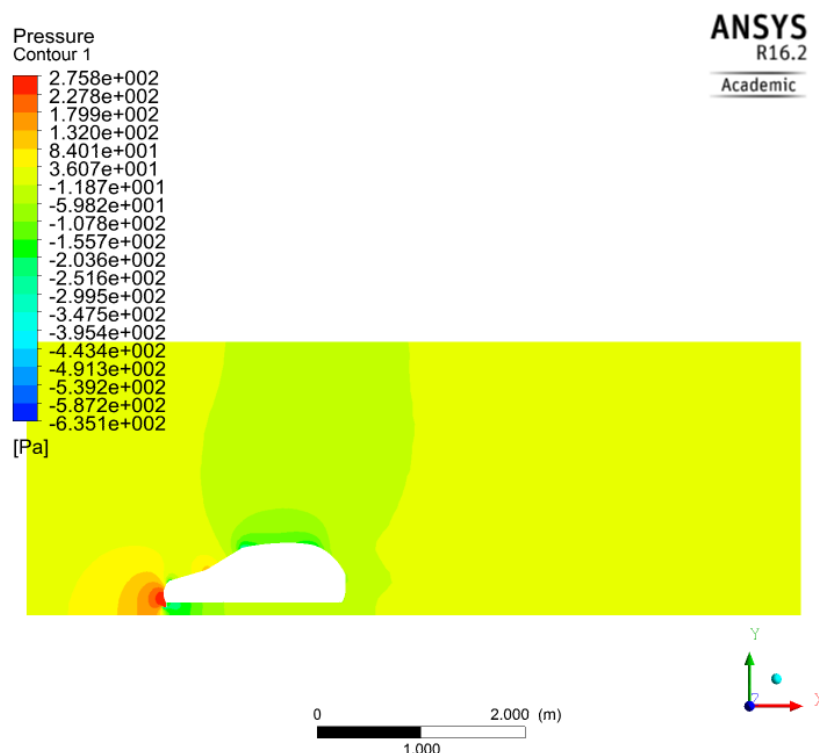


Fig. 6.3. 1ª modificación. Distribución de presiones en el plano de simetría.

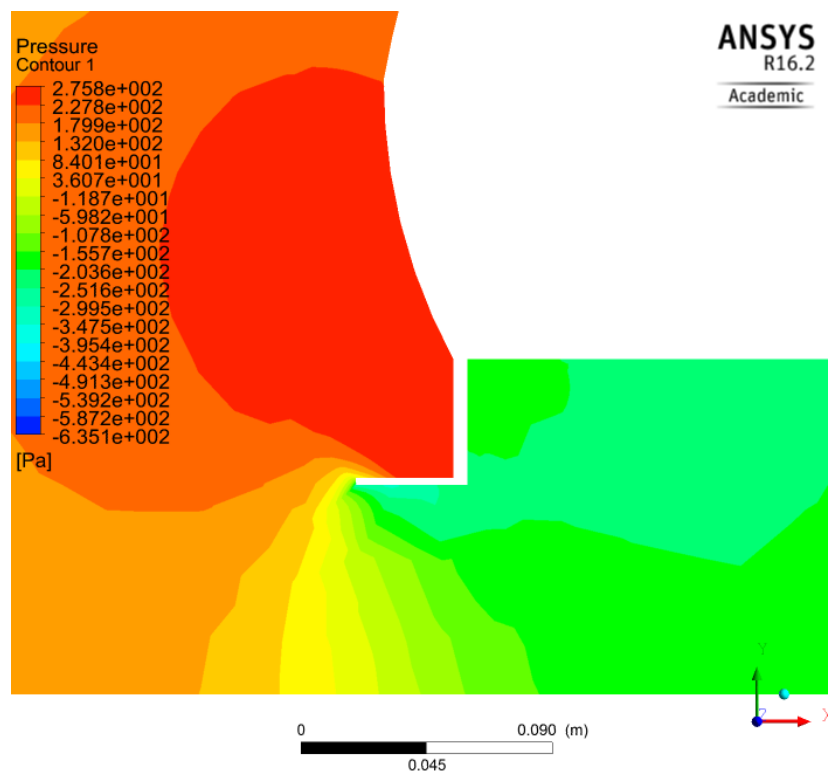


Fig. 6.4. 1ª modificación. Distribución de presiones en el spoiler delantero.

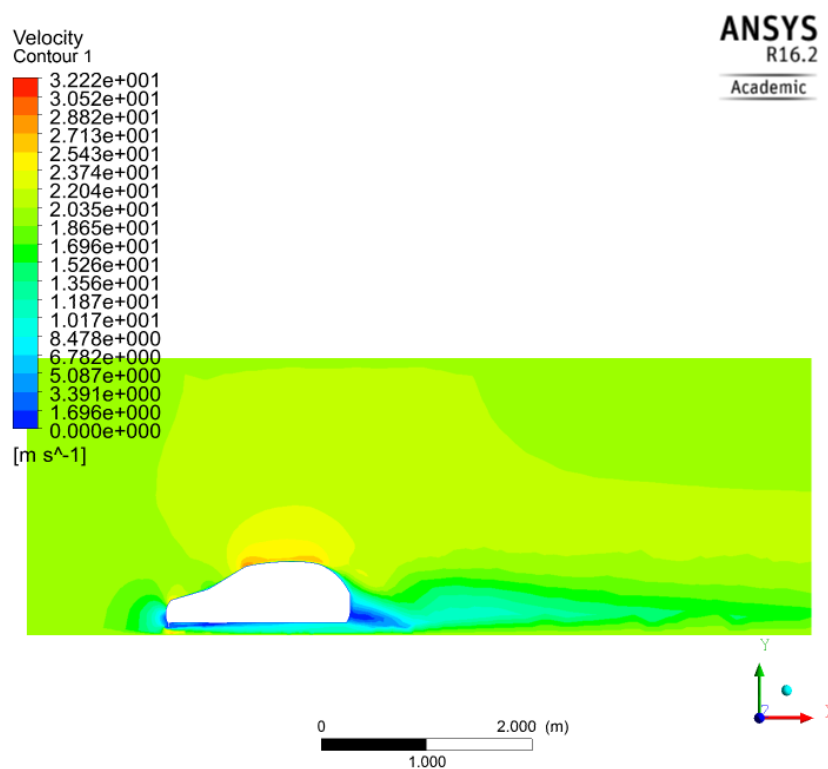


Fig. 6.5. 1ª modificación. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

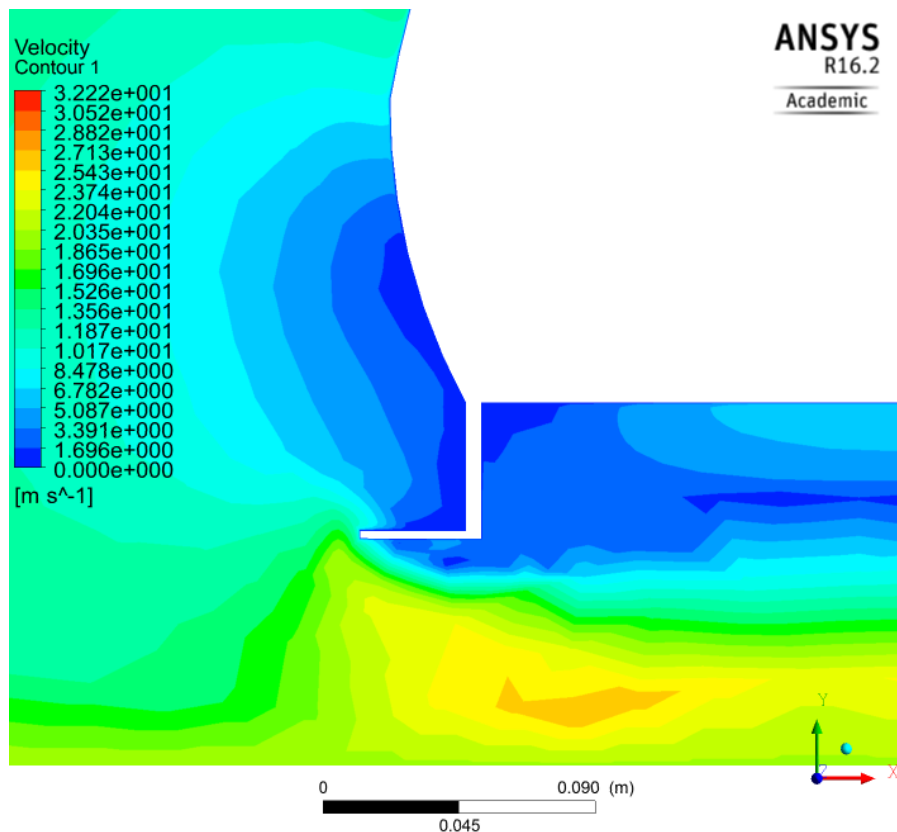


Fig. 6.6. 1ª modificación. Distribución de velocidades en el spoiler delantero.

6.2. Spoiler trasero

El funcionamiento de un spoiler trasero es el mismo que el de un alerón trasero, pero su efecto es diferente. Su objetivo es propiciar que el flujo que circula o que baja por el techo se separe antes de llegar a la parte final del vehículo. De esta manera se consigue reducir la velocidad del fluido en esta zona, provocando que se generen presiones no tan bajas y en consecuencia, generando un mayor *lift* en el eje posterior. Además se pretende compensar el *downforce* que se ha generado en la parte delantera, hecho que puede provocar una descompensación por el desplazamiento del centro de masas del vehículo y generar la pérdida de adherencia de las ruedas traseras.

Análogamente a la primera modificación, en un estudio llevado a cabo en un turismo convencional, se determinó que el mayor beneficio, representado por el cambio de sustentación trasera (Δc_{L_f}), se consigue con un spoiler plano del 8% de batalla del

coche, obteniendo así, un valor de Δc_L de -0,45. Además, se ha demostrado que el ángulo influye de manera beneficiosa en la aerodinámica de la parte trasera. Cuanto mayor sea el ángulo, mayor será el beneficio, de alrededor de -0,12 con 30° y subiendo a -0,19 con 60° . Pero este beneficio empieza a desvanecerse a partir de los $40-50^\circ$, donde la resistencia al avance empieza a aumentar de forma lineal con el incremento de ángulo, hasta un máximo de +0.08 a los 60° [8].

La efectividad de los spoilers depende de la geometría del coche y lo que ha ocurrido en el camino del flujo hasta la parte trasera. Se puede reducir considerablemente el *lift* con un spoiler de altura muy pequeña e incluso se puede lograr reducir el *drag* si la aportación al área frontal no es muy grande. Pero si la altura del spoiler aumenta, el *drag* empezará a aumentar de nuevo.

A continuación se puede observar en la Fig. 6.7 el efecto de un spoiler trasero en un turismo tipo *notchback*. En el caso del vehículo de este trabajo, es tipo *fastback*, con el trasero más redondeado, pero los valores se pueden tomar como referencia [9].

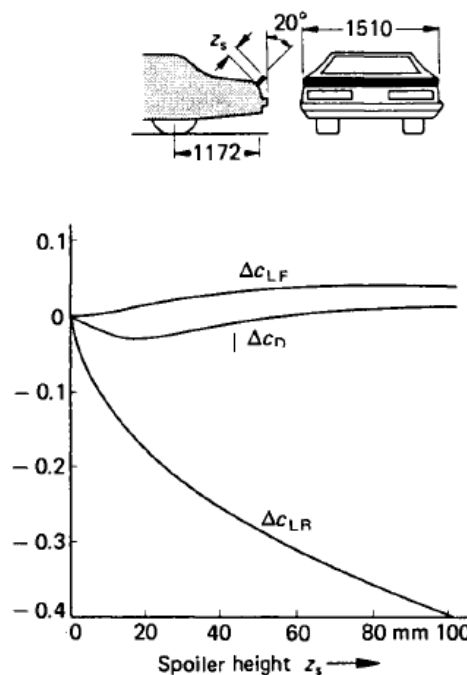


Fig. 6.7. Efecto del spoiler trasero en el drag y en el lift [9].

En definitiva, se ha utilizado un spoiler en la parte trasera del vehículo, ubicado en la unión entre el techo y el parabrisas posterior, con una longitud del 8% de batalla del coche, es decir, de 0,28 m. El spoiler se ha ubicado de forma que la parte superior del spoiler sea tangente a la superficie superior del turismo para generar la mínima

aportación de *drag* posible. Por lo tanto, el área proyectada frontal se mantiene constante. Se puede observar el croquis y la geometría del spoiler trasero en las siguientes figuras: Fig. 6.8, Fig. 6.9 y Fig. 6.10.

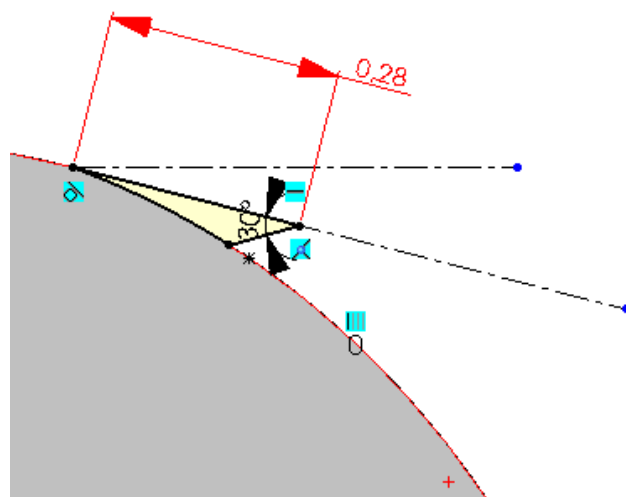


Fig. 6.8. Croquis del spoiler trasero 1.

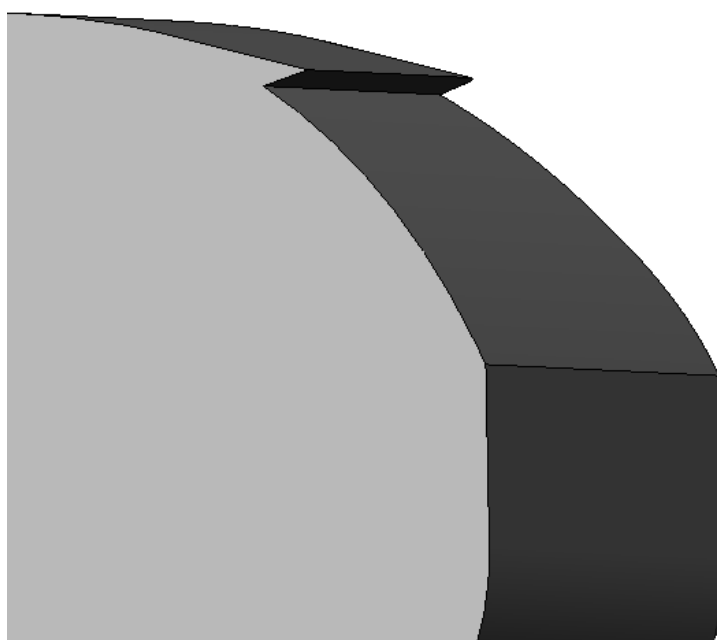


Fig. 6.9. Geometría del spoiler trasero 2.

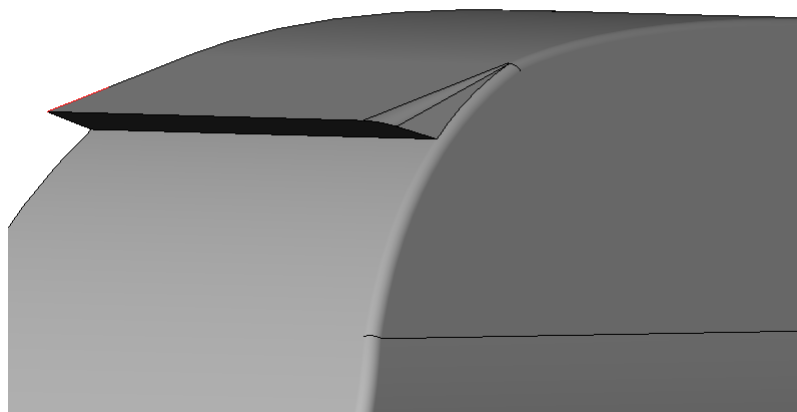


Fig. 6.10. Geometría del spoiler trasero 3.

A continuación se presenta una comparativa de los resultados obtenidos de las dos modificaciones aplicadas (spoiler delantero y trasero) respecto del modelo original:

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4054	0,1196	0,1957	0,2950	0,1024	0,0302	24,5874	7,2540	20,7688
Modificación	0,3925	-0,0064	0,1610	0,0163	0,1067	-0,0017	25,6036	-0,4175	18,3791
Variación	-3,18%	-105,35%	-17,73%	-94,47%	4%	-105,63%	4,13%	-105,75%	-11,51%

Tabla 6.2. Tabla de resultados de la segunda modificación.

Como se puede observar en la Tabla 6.2, una vez aplicada la modificación de los spoilers delantero y trasero, se obtienen ya unos buenos resultados de mejora reduciendo el valor de los coeficientes de resistencia al avance y de sustentación, incluso se consigue un valor negativo de este último que asegura un buen agarre de los neumáticos. Este último valor, a pesar de todo, es un valor muy pequeño, lo que puede provocar que a velocidades más altas, este valor se vuelva positivo. Por este motivo, se continuarán introduciendo modificaciones. La reducción del *lift* era previsible, pero la reducción del *drag*, como se observa en la Fig. 6.7, existe una pequeña zona donde el *drag* disminuye, puede ser debido a que la reducción de la velocidad en la zona de la estela, genera un *drag* por presión menor, a pesar de que la zona de la estela sea mayor que en el caso del modelo de serie (Fig. 5.17). Pero a pesar de la reducción del coeficiente de *drag*, esta reducción es inferior al aumento de área frontal que produce el spoiler delantero, por ello, la fuerza de *drag* total ha aumentado.

A continuación se presentan una serie de figuras donde se ilustra el efecto conjunto de las modificaciones añadidas hasta el momento en el flujo de aire. Se observa como la estela generada es de mayor tamaño (Fig. 6.11) y como era de esperar, el desprendimiento de capa límite se produce mucho antes que en el modelo original y en la parte final del spoiler trasero (Fig. 6.13).

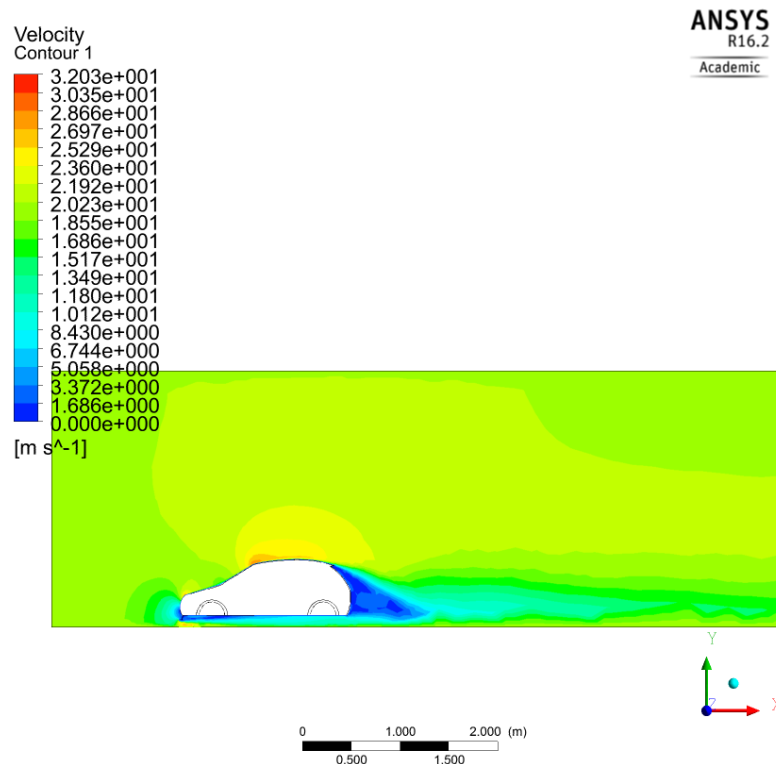


Fig. 6.11. 2ª modificación. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

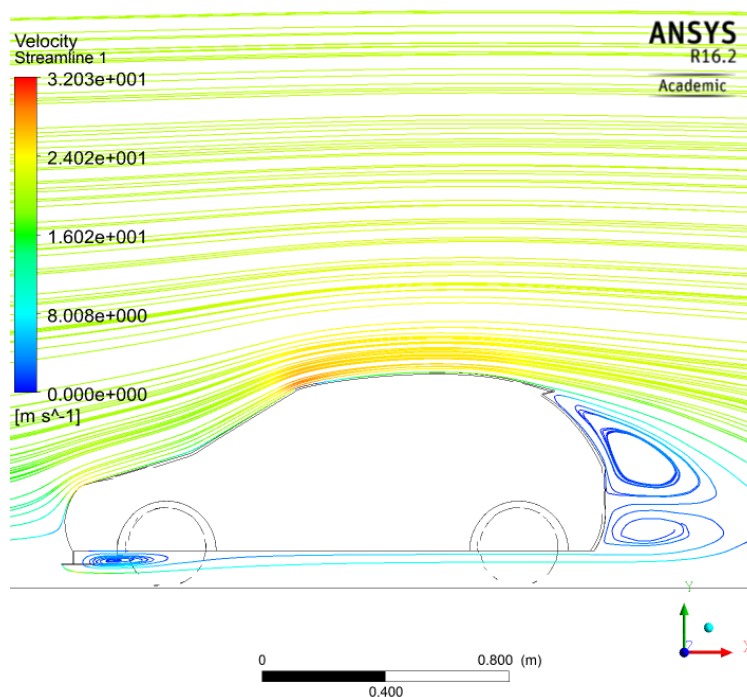


Fig. 6.12. 2^a modificació. Líneas de corriente en el plano de simetría.

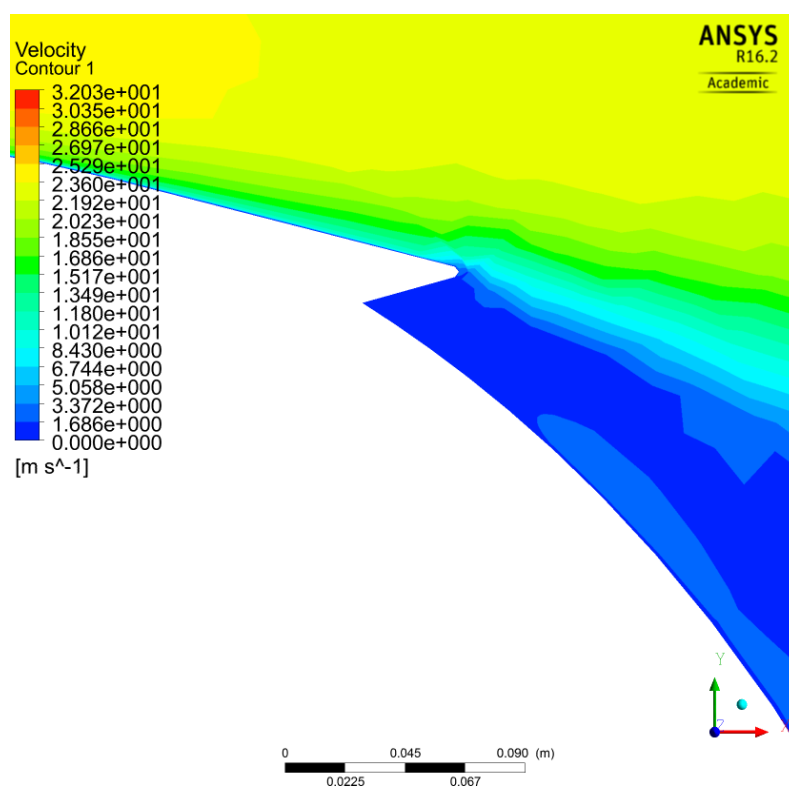


Fig. 6.13. 2^amodificació. Visualización del desprendimiento de capa límite del spoiler trasero.

6.3. Faldones laterales

Esta mejora no genera *downforce* por si sola, pero como se ha comentado anteriormente (apartado 6.1), la introducción de faldones laterales mejora el rendimiento del spoiler delantero, favoreciendo el sellado del suelo y reduciendo la altura del coche. Los faldones laterales son una placas planas, de la misma altura que el spoiler delantero, que se ubican en la parte inferior de los laterales del coche entre ambas ruedas y su objetivo es ayudar a mantener el vacío en la parte inferior del vehículo generado por el spoiler delantero. A diferencia del modelo de serie, en la parte inferior delantera se crea una zona de bajas presiones y ahora es el aire de los laterales el que quiere entrar en la zona inferior. Esta mejora no genera un aumento del área frontal, por tanto, la introducción del spoiler trasero y de los faldones laterales mantienen el área frontal constante e igual a $0,2718 \text{ m}^2$.

En la figura Fig. 6.14 se observa uno de los faldones laterales instalados en el vehículo.

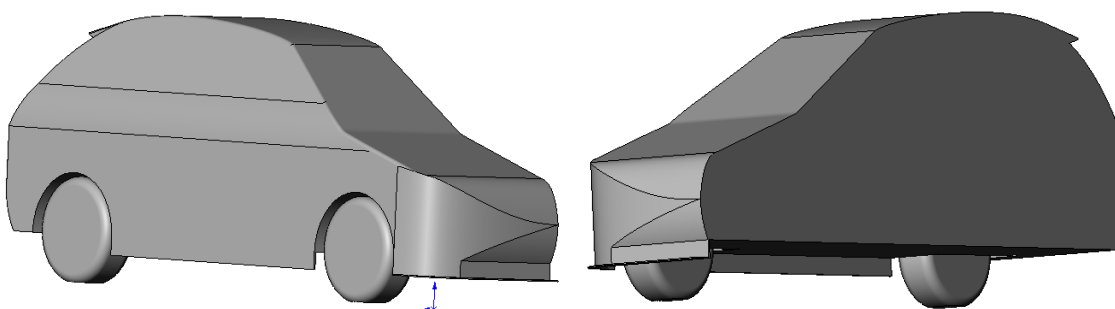


Fig. 6.14. Faldón lateral instalado en el vehículo.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los resultados obtenidos una vez aplicada la mejora de los faldones laterales junto con las dos modificaciones anteriores, respecto el modelo original de serie:

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4054	0,1196	0,1957	0,2950	0,1024	0,0302	24,5874	7,2540	20,7688
Modificación	0,3862	0,0114	0,1669	0,0295	0,1050	0,0031	25,1926	0,7436	19,0526
Variación	-4,74%	-90,47%	-14,72%	-90%	2,54%	-89,73%	2,46%	-89,75%	-8,26%

Tabla 6.3. Tabla de resultados de la tercera modificación.

A continuación se muestran una serie de figuras para visualizar el comportamiento del flujo una vez aplicada la mejora aerodinámica:

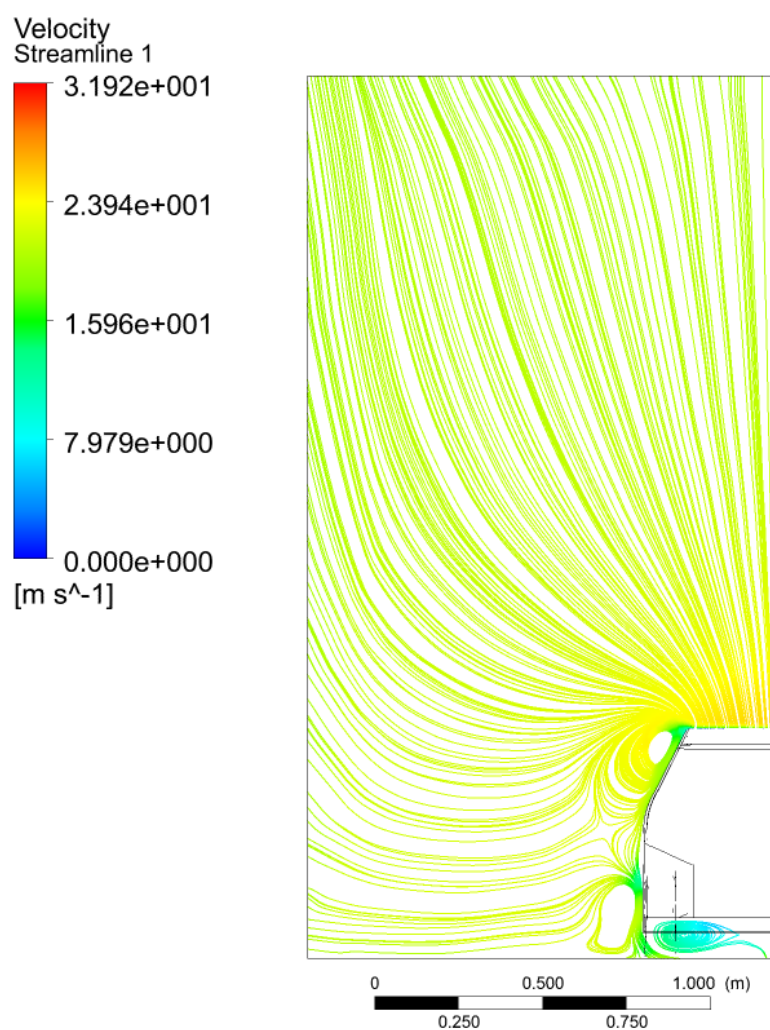


Fig. 6.15. 3ª modificación. Líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

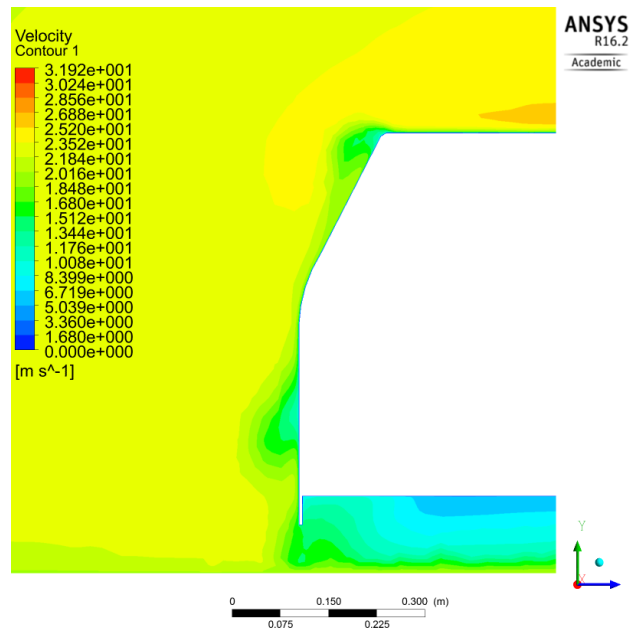


Fig. 6.16. 3ª modificación. Distribución de velocidades en el plano de visualización de los laterales.

Analizando los resultados obtenidos (Tabla 6.3) se observa una reducción de los coeficientes de resistencia al avance y de sustentación, pero en comparación al caso anterior, en este caso la sustentación sigue siendo positiva. El efecto de los faldones laterales es evitar que menos aire que circula por el fondo del coche se mezcle y se escape hacia el exterior, de este modo, aumenta la cantidad de aire que circula por el fondo del coche, aumentando el *lift* total. Este aumento de aire en la parte inferior del coche, mejorará la eficiencia de un difusor. En la Fig. 6.15 y en la Fig. 6.16 se observa como el aire del fondo del coche continua mezclándose con el aire que circula por los laterales y aparecen en este caso dos vórtices, uno en la parte exterior y otro en la parte interior de los faldones laterales.

6.4. Difusor

Los difusores son elementos conocidos por su aplicación en vehículos de competición para la generación de *downforce*, pero su uso también es beneficioso, aunque que se aplican en menor medida, en vehículos de pasajeros. Los beneficios que aporta el difusor a un turismo es la reducción de la resistencia al avance, de los vórtices y de la fricción de los bajos. Por este motivo, el uso de difusores permite que el vehículo consuma menos combustible y mejora la estabilidad por la

generación de *downforce* al aumentar la velocidad en la zona trasera.

En la Fig. 6.17 se muestran varias configuraciones de difusor según la longitud del difusor respecto la longitud del vehículo y el ángulo del difusor [10]. Se puede observar como una de las mejores soluciones es la de un difusor de gran longitud y de poca inclinación.

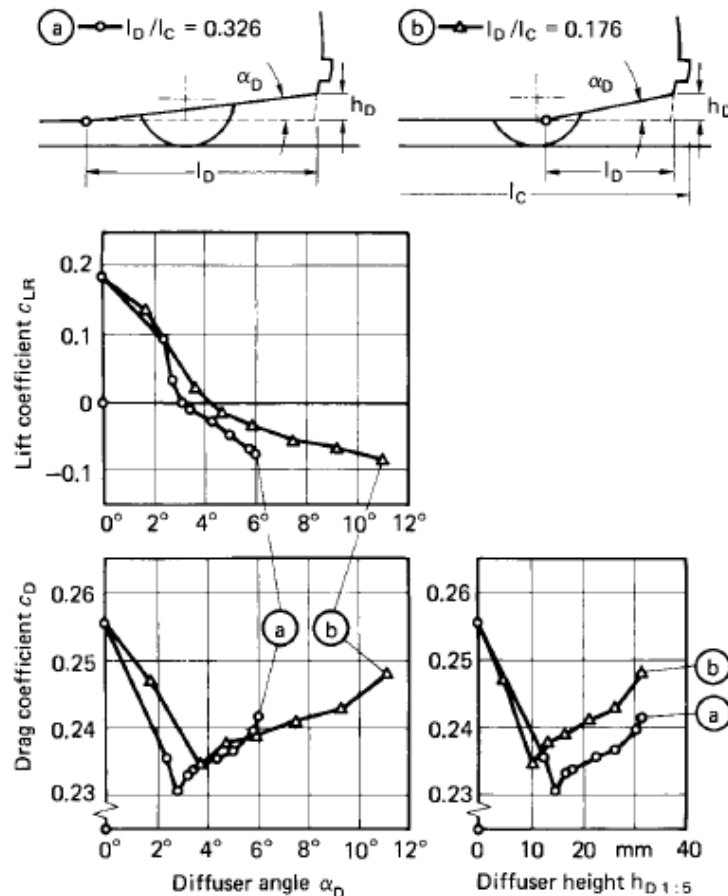


Fig. 6.17. Efecto del difusor en el C_D y en C_{LR} en función del ángulo y de la longitud.

Tomando la Fig. 6.17 como referencia, se ha optado por introducir un spoiler de gran longitud, el spoiler tipo a, que corresponde a una longitud de 0,326 veces la longitud de la cuerda del coche. Como se observa en las gráficas, el difusor de gran longitud es con el que se obtienen mejores resultados. En cuanto al ángulo, se ha optado por un ángulo pequeño, como se observa, a partir de los 3°, el difusor ha alcanzado la mínima reducción de C_D , pero para alcanzar una reducción un poco mayor de C_L , se ha optado por introducir un difusor con un ángulo de 4°. A continuación, en la Fig. 6.18 se observa el croquis y la geometría del difusor implementado.

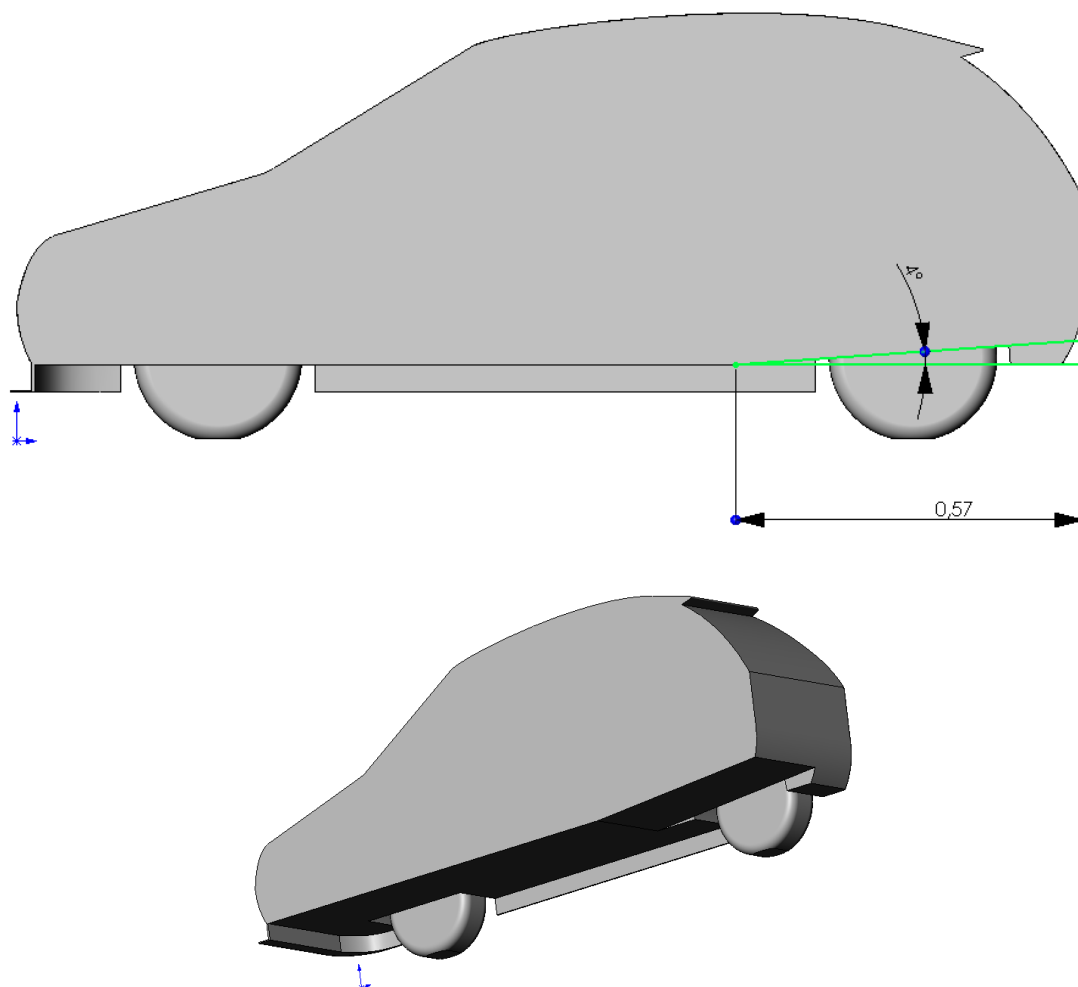


Fig. 6.18. Croquis y geometría del difusor implementado.

A continuación se presenta una tabla comparativa de los resultados obtenidos de todas las modificaciones aplicadas hasta ahora con los resultados de la simulación con el modelo de serie. Como el difusor tampoco afecta al área frontal del vehículo, el área frontal se mantiene constante e igual a $0,2718 \text{ m}^2$.

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	$F_D \text{ [N]}$	$F_L \text{ [N]}$	$M \text{ [N} \cdot \text{m]}$
Original	0,4054	0,1196	0,1957	0,2950	0,1024	0,0302	24,5874	7,2540	20,7688
Modificación	0,3856	-0,0651	0,1234	0,1688	0,1048	-0,0177	25,1535	-4.2466	14,0868
Variación	-4,88%	-154,43%	-36,94%	-42,78%	2,34%	-158,61%	2,30%	-158,54%	-32,17%

Tabla 6.4. Resultados de la cuarta modificación.

Analizando los resultados se observa como el valor del coeficiente de resistencia al avance se ha visto reducido en casi un 5% y el valor de la fuerza de resistencia al avance total se mantiene prácticamente constante, solo aumenta en un 2,3%, como se observa que la reducción del coeficiente de resistencia al avance no es superior al aumento del área frontal. Se puede dar por bueno este resultado teniendo en cuenta la gran mejora de la sustentación que se obtiene, ya que mejora en un 150% y se obtiene un coeficiente de sustentación negativo por lo que se asegura un buen agarre del vehículo al circular a esta velocidad y a velocidades superiores.

A continuación se presentan una serie de figuras donde se puede observar la influencia del difusor y del resto de modificaciones en el flujo de aire:

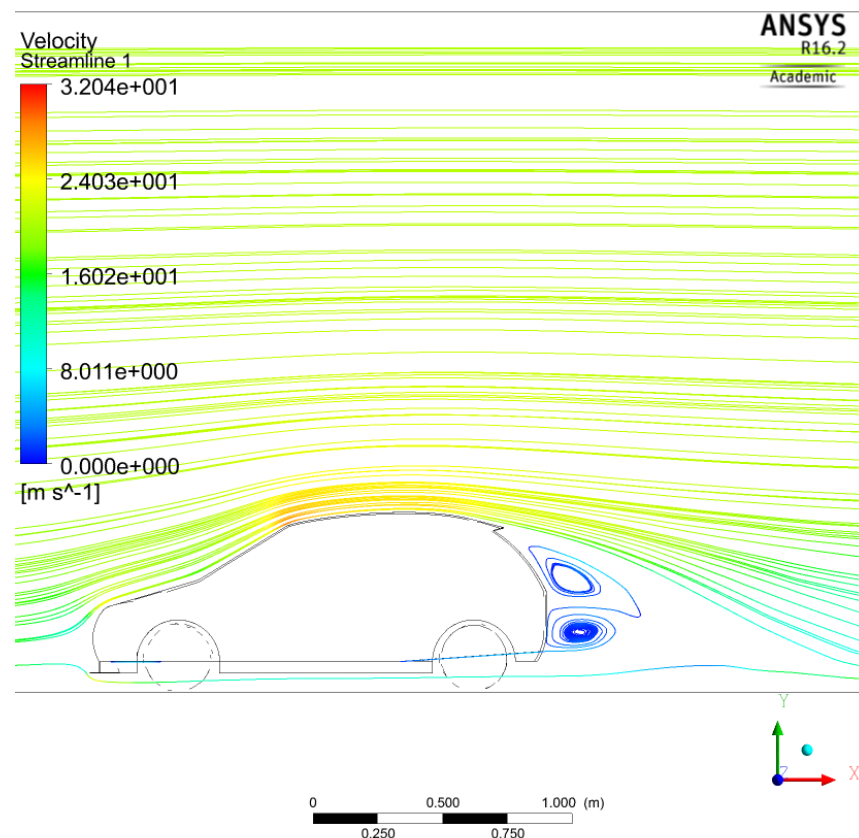


Fig. 6.19. 4ª modificación. Líneas de corriente en el plano de simetría.

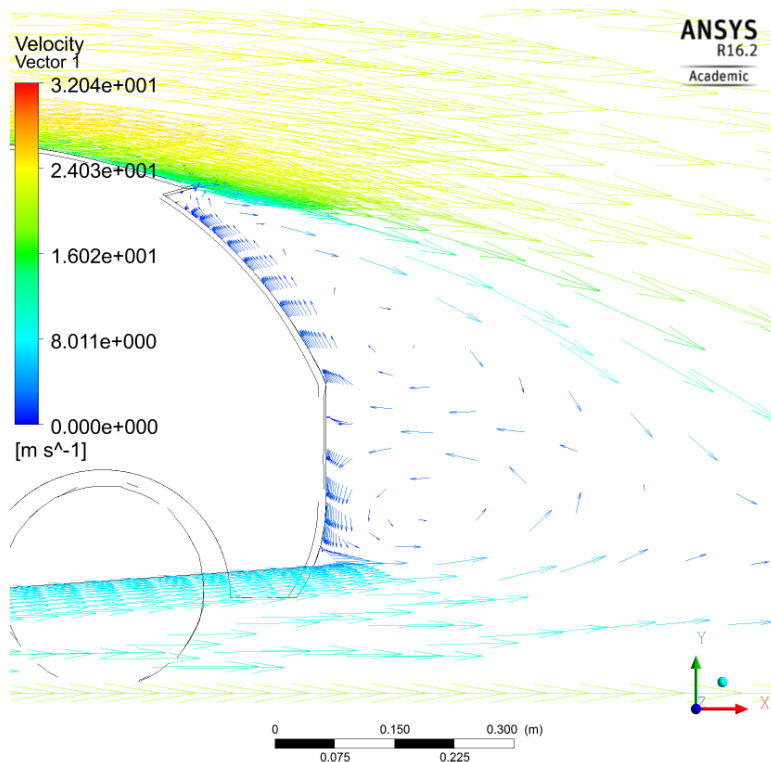


Fig. 6.20. 4ª modificación. Visualización de la estela generada en la parte posterior.

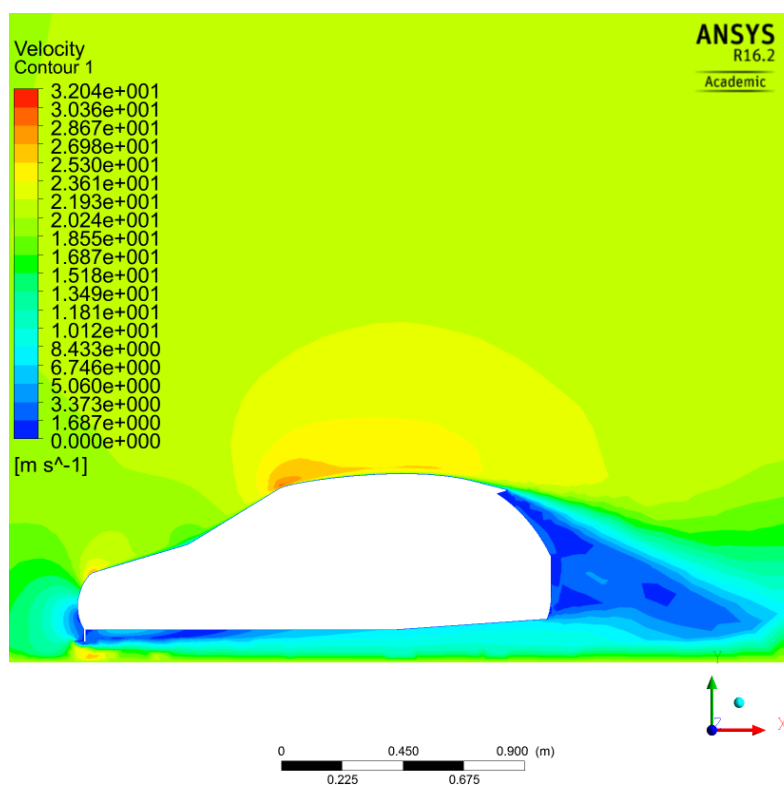


Fig. 6.21. 4ª modificación. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

En las figuras anteriores se puede observar como la geometría del difusor provoca que el flujo se mantenga pegado a la superficie del difusor, provocando una reducción de la estela generada en la parte posterior del vehículo.

6.5. Alternativas descartadas

6.5.1. Alerón

El funcionamiento de un alerón es el mismo que el de un spoiler posterior. El uso de un alerón ha sido descartado fundamentalmente por la geometría del vehículo en cuestión. El coche es un modelo tipo *fastback* y se caracteriza por tener una parte trasera muy redondeada y presenta poco espacio donde colocar un alerón. El alerón debería colocarse con los soportes a través del cristal para que el flujo pueda incidir sobre el alerón de forma horizontal y no generar mucho aumento del área frontal. En cambio, si el alerón se colocara en la parte superior del vehículo, el área frontal proyectada frontal aumentaría demasiado y consigo, la fuerza de resistencia al avance y el consumo de combustible. En cambio, con el uso de un spoiler se puede conseguir el mismo efecto que el de un alerón con un elemento de muy poca superficie. Aumentando la altura y la longitud de este elemento de pequeñas dimensiones, se logra disminuir en gran medida el C_L a la vez que aumenta en menor medida el C_D ,

Por otra parte, el uso de un alerón lleva consigo muchas pruebas en túnel de viento y muchas simulaciones para encontrar la geometría y el ángulo óptimos del alerón. En cambio la geometría del spoiler se puede aproximar a una placa plana que sobresale del extremo superior del coche de forma tangente o con un cierto ángulo.

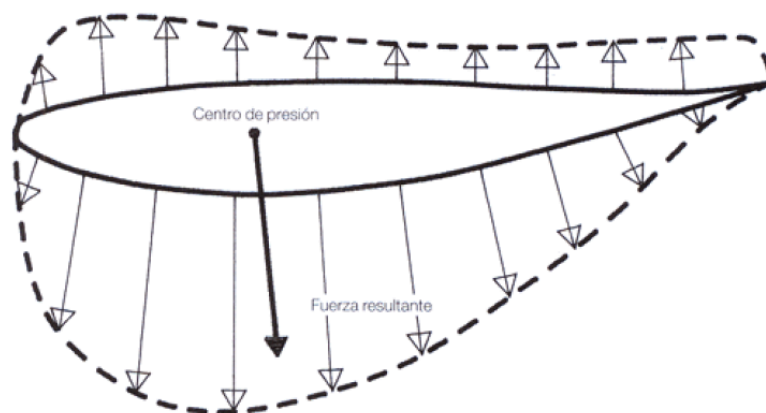


Fig. 6.22. Distribución de presiones alrededor de un alerón.

6.5.2. Placas de hundimiento

Las placas o planos de hundimiento están fijadas a ambos lados en la parte delantera. Son un medio de afinar la puesta a punto de la aerodinámica del turismo debido a que genera un pequeño aumento del *downforce* y su uso permite el sellado del fondo.

Se ha descartado su implementación debido a que el diseño de su geometría, la optimización del número de placas, la posición e inclinación para que generen lo que se espera obtener con su uso, requiere de numerosas simulaciones y pruebas en túneles de viento debido a que no se dispone de geometrías normalizadas para su implementación ya que se adaptan a la geometría del vehículo y su uso queda prácticamente restringido a coches de competición.

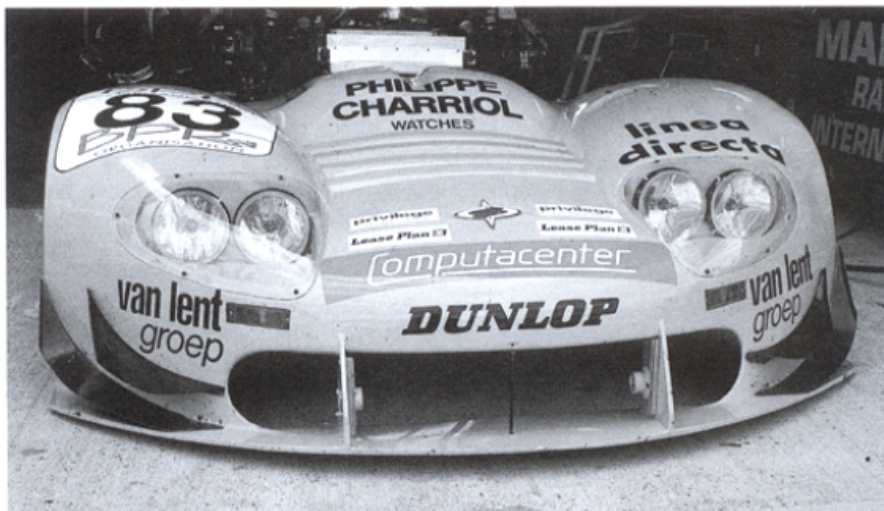


Fig. 6.23. Placas de hundimiento.

6.5.3. Efecto suelo

Este tipo de mejora es muy útil debido a que se puede conseguir mejorar la aerodinámica del vehículo con la propia geometría del turismo. Consiste en diseñar la parte delantera del coche para que conduzca el flujo de aire hacia la parte central del fondo del coche, más estrecha, y posteriormente hacia un difusor divergente que aumente la sección de paso que ayude al flujo a abandonar el vehículo. De esta forma se facilita la circulación del fluido por la parte inferior del vehículo, retardando la formación de capa límite y provocando que el flujo circule más rápido. Para crear

el efecto suelo es necesario que la distancia entre el fondo del coche y el suelo sea pequeña.

Esta mejora aerodinámica se ha descartado debido que supone la modificación de la geometría del vehículo y los objetivos de este trabajo son mejorar la aerodinámica del turismo únicamente con apéndices aerodinámicos.

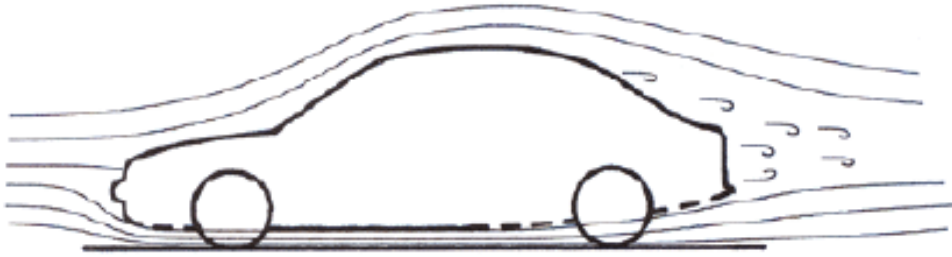


Fig. 6.24. Efecto suelo.

6.6. Visualización de resultados

Una vez estudiadas las posibles mejoras aerodinámicas, se procede a hacer el estudio aerodinámico del turismo modificado a las diferentes velocidades de simulación:

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4054	0,1196	0,1957	0,2950	0,1024	0,0302	24,5874	7,2540	20,7688
Modificación	0,3856	-0,0651	0,1234	0,1688	0,1048	-0,0177	25,1535	-4.2466	14,0868
Variación	-4,88%	-154,43%	-36,94%	-42,78%	2,34%	-158,61%	2,30%	-158,54%	-32,17%

Tabla 6.5. Comparación de resultados con las modificaciones aplicadas a $V = 20$ m/s.

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4059	0,1232	0,1968	0,3036	0,1026	0,0311	75,3896	22,8825	63,9670
V = 35 m/s	0,3837	-0,0693	0,1354	0,1806	0,1043	-0,0188	76,6529	-13,8443	47,3362
Variación	-5,47%	-156,25%	-31,20%	-40,51%	1,66%	-160,45%	1,67%	-160,50%	-26%

Tabla 6.6. Comparación de resultados con las modificaciones aplicadas a $V = 35$ m/s.

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4069	0,1252	0,1980	0,3077	0,1028	0,0316	154,2354	47,4571	131,3408
V = 50 m/s	0,3843	-0,0787	0,1250	0,2048	0,1044	-0,0214	156,6781	-32,0860	89,1844
Variación	-5,55%	-162,86%	-36,87%	-33,44%	1,56%	-167,72%	1,58%	-167,61%	32,10%

Tabla 6.7. Comparación de resultados con las modificaciones aplicadas a $V = 50$ m/s.

Analizando los resultados se puede observar la tendencia a la alza de la eficiencia aerodinámica una vez aplicadas las mejoras. Se puede observar como la eficiencia aumenta con la velocidad, debido a que al aumentar la velocidad, el coeficiente de sustentación disminuye y en cambio, el coeficiente de arrastres se mantiene prácticamente constante. En definitiva, se ha reducido drásticamente el coeficiente de sustentación, valor muy importante para garantizar la fiabilidad y maniobrabilidad en la conducción y se ha podido reducir el valor del coeficiente de resistencia al avance pero el valor de la fuerza de resistencia al avance total se ha mantenido constante.

Como en el capítulo 5.4.3, a continuación se pueden observar una serie de figuras donde se observa claramente la influencia que tienen los apéndices aerodinámicos instalados en comparación con el modelo de serie. Para reducir el número de figuras ilustradas, se muestran las correspondientes a las velocidad de 35 m/s. Figuras complementarias a esta velocidad y las correspondientes a las demás velocidades se puede ver en el anexo C.

Distribución de presiones

Con las figuras siguientes se pueden observar los puntos de estancamiento (parte frontal del parachoques, parte frontal de ambas ruedas, unión del capó y el parabrisas delantero) y las zonas de depresión donde se encontrarán velocidades muy elevadas (contorno de vehículo, contorno de las ruedas e inicio del difusor).

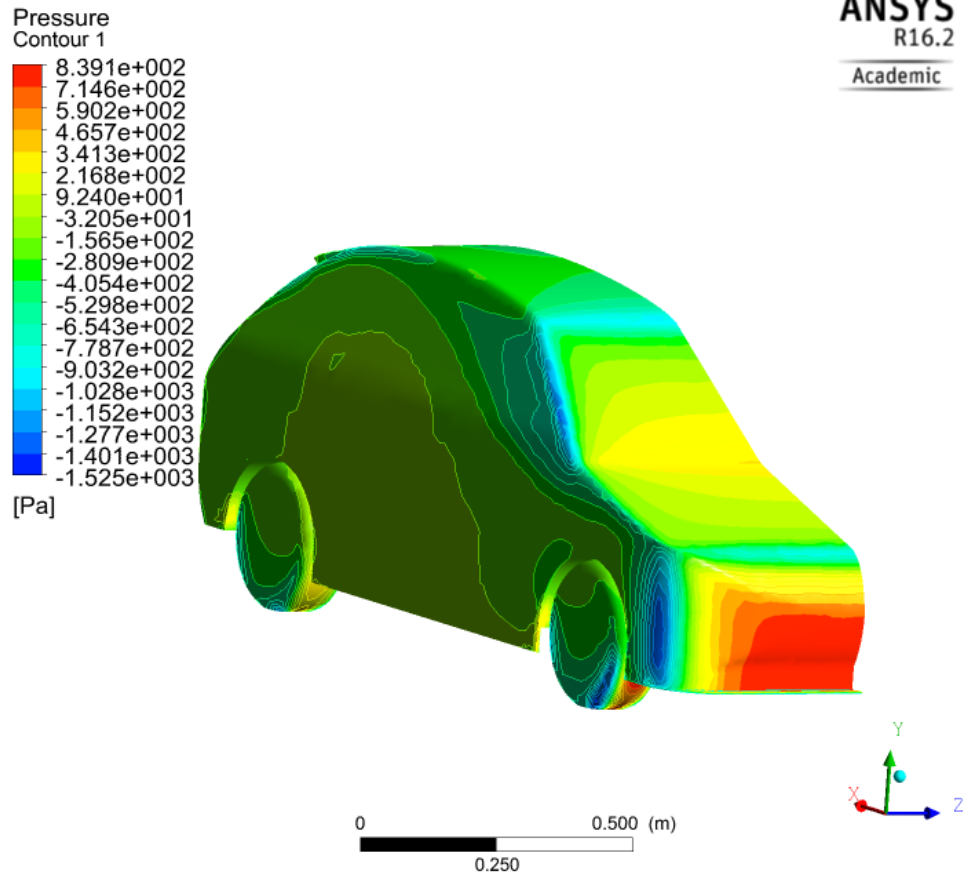


Fig. 6.25. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

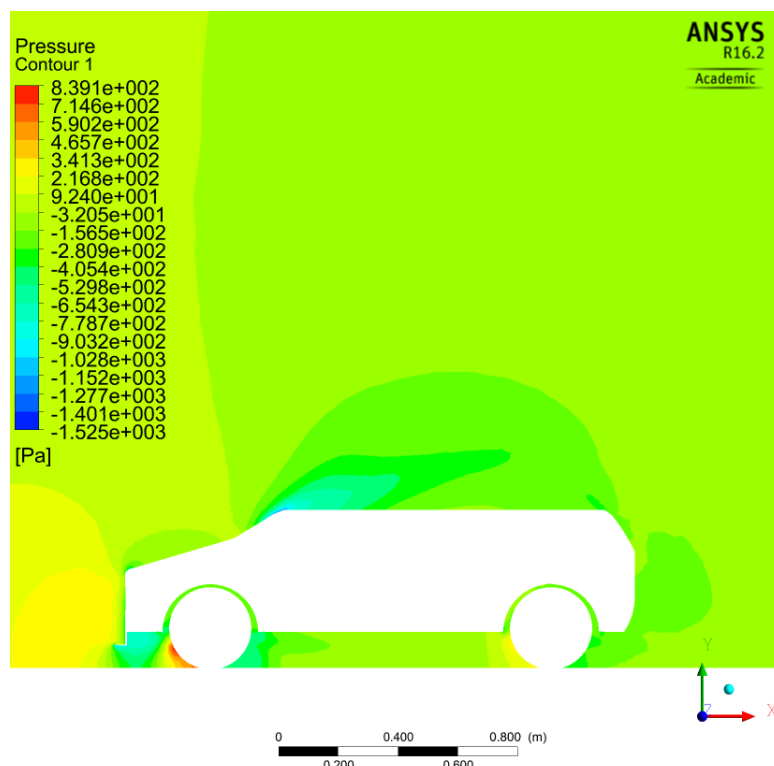


Fig. 6.26. Detalle de la distribución de presiones en el plano de perfil de las ruedas.

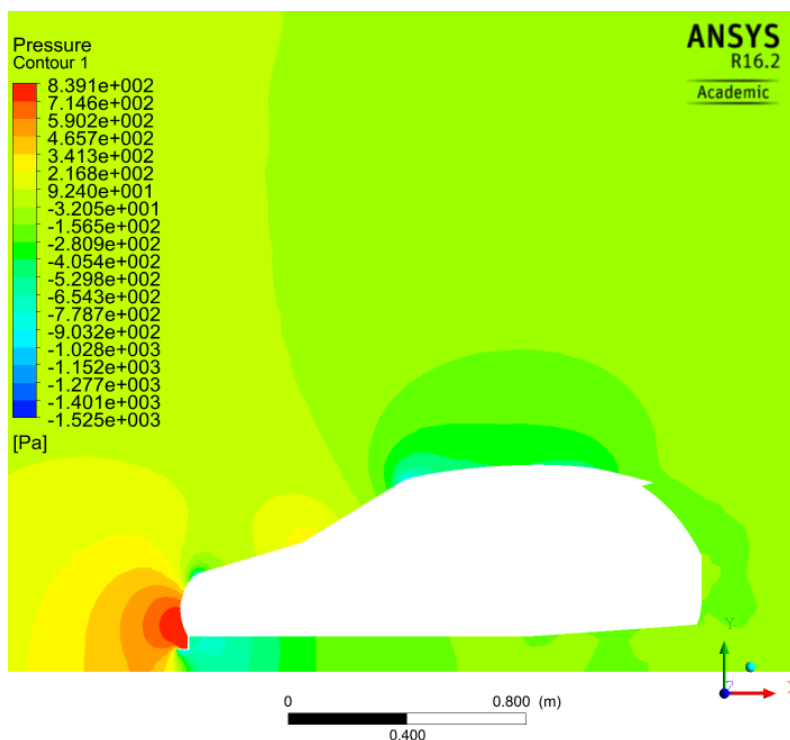


Fig. 6.27. Detalle de la distribución de presiones en el plano de simetría.

Distribución de velocidades

Con estas figuras se pueden observar los puntos de máxima velocidad, la generación de estelas y la generación de vórtices.

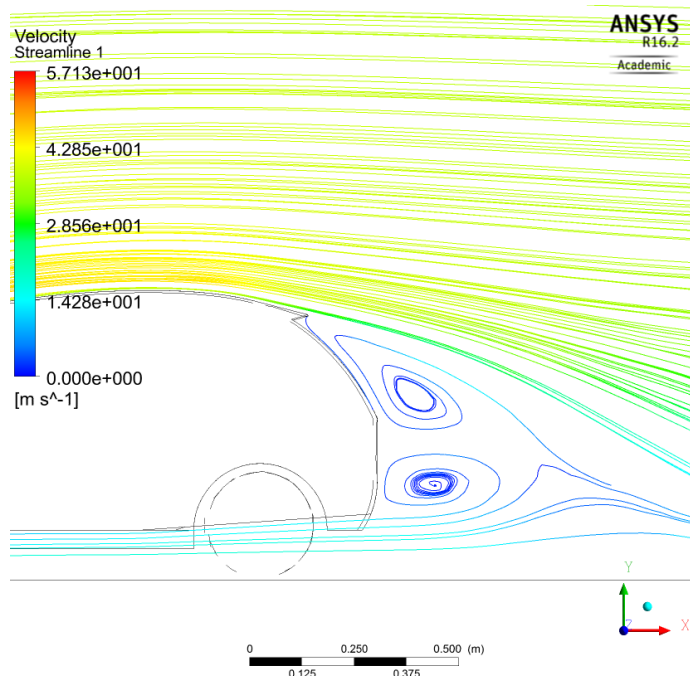


Fig. 6.28. Generación de vórtices en la parte trasera.

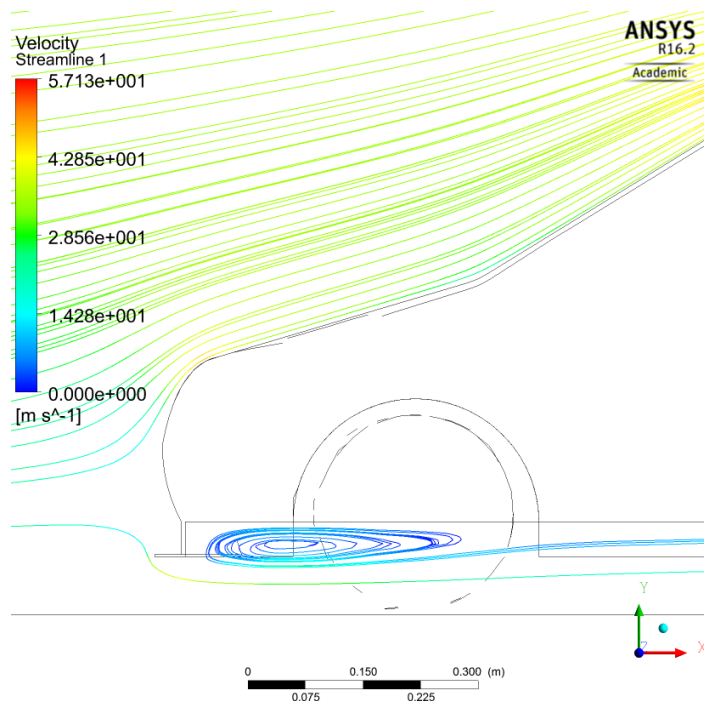


Fig. 6.29. Generación de vórtices en la parte delantera.

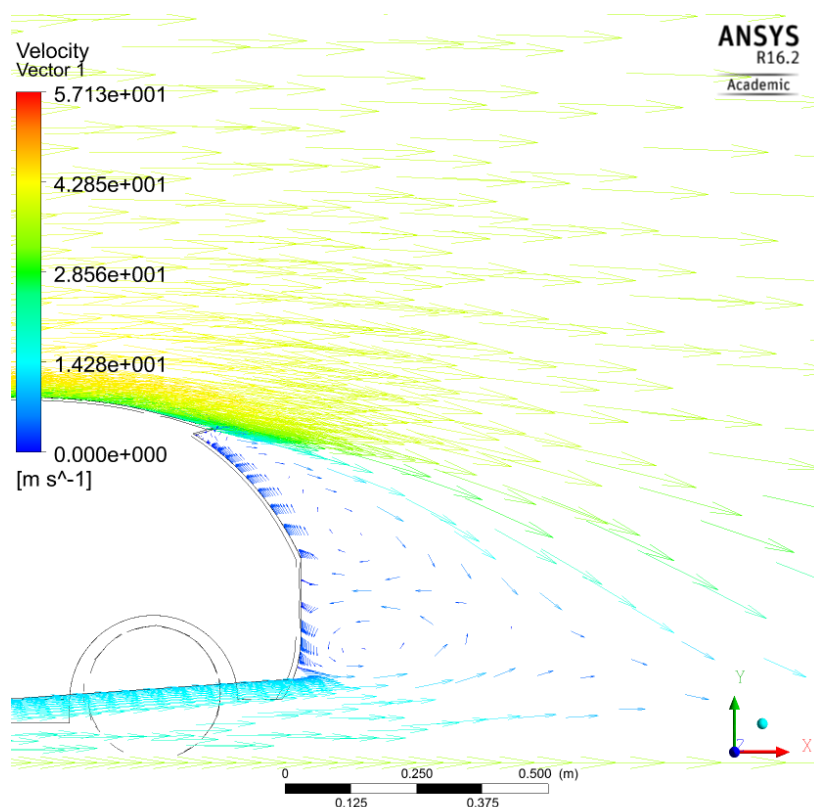


Fig. 6.30. Visualización de la estela posterior del vehículo.

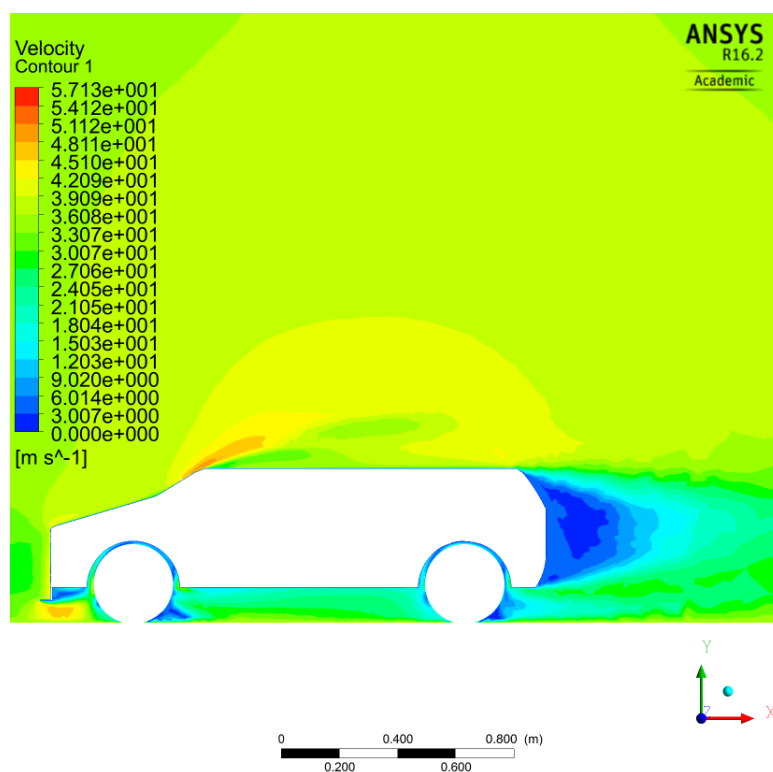


Fig. 6.31. Detalle de la distribución de velocidades en el plano de perfil de las ruedas.

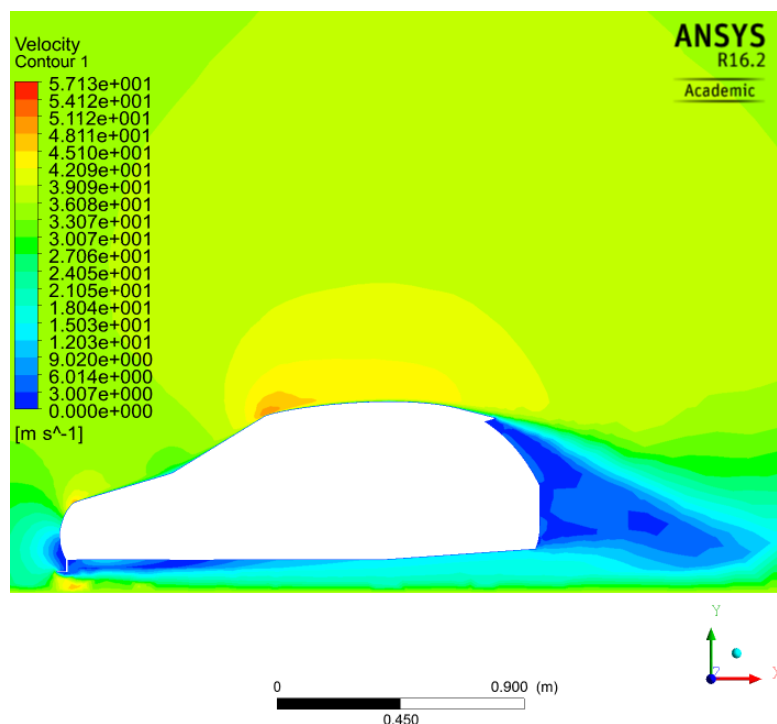


Fig. 6.32. Detalle de la distribución de velocidades en el plano de simetría.

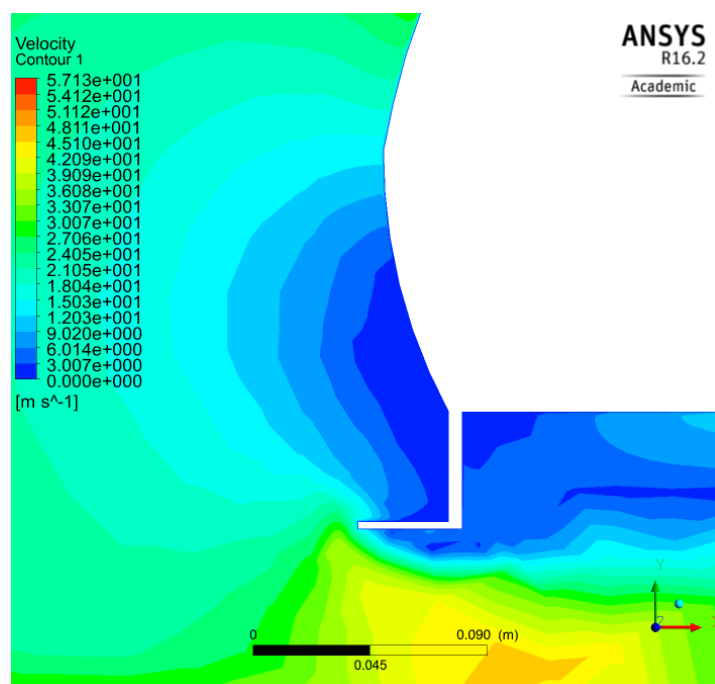


Fig. 6.33. Distribución de velocidades en el spoiler delantero.

Laterales del vehículo

La siguiente figura permite ver los vórtices generados tanto en la parte posterior donde se observa como el aire del fondo del coche se mezcla con el aire que fluye por los laterales, y el vórtice generado en la parte superior.

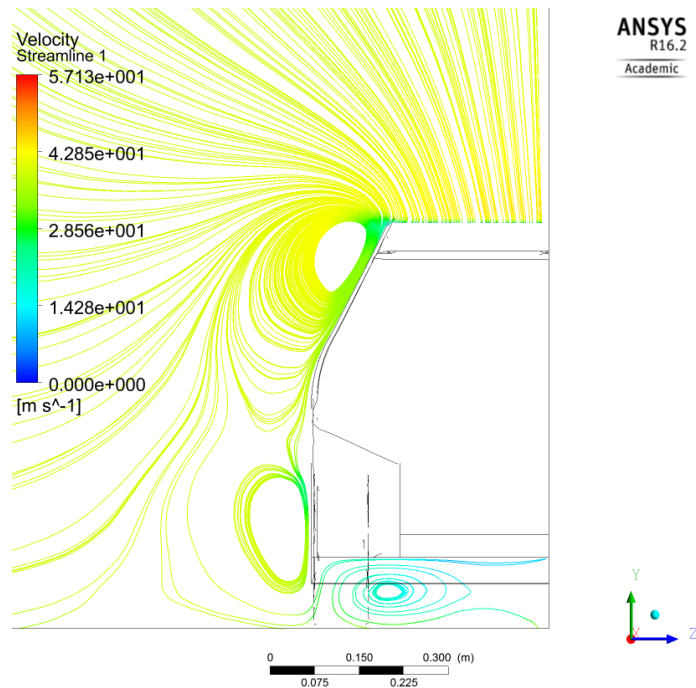


Fig. 6.34. Líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

Visualización de la turbulencia

Las siguientes figuras muestran las líneas de corriente generadas en los planos introducidos para visualizar la turbulencia en la parte posterior del vehículo. Se observa como la generación del vórtice aparece más tarde que en el modelo de serie como era de esperar al introducir el difusor.

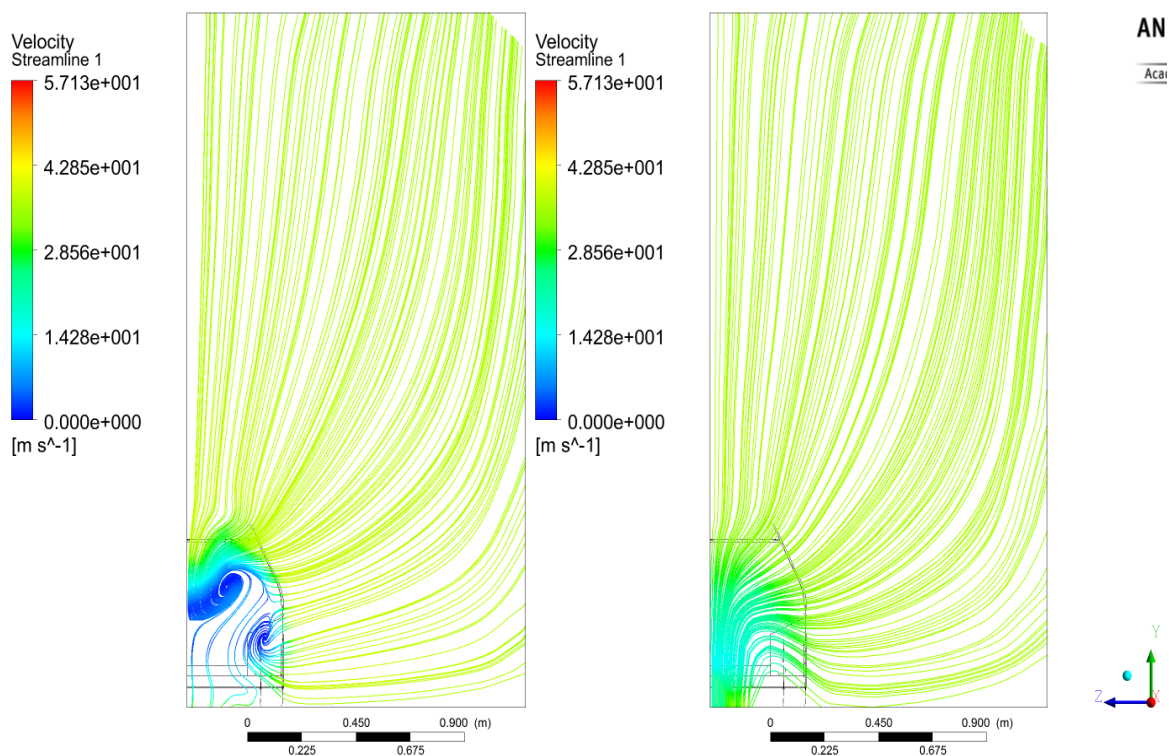


Fig. 6.35. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 1 y 2.

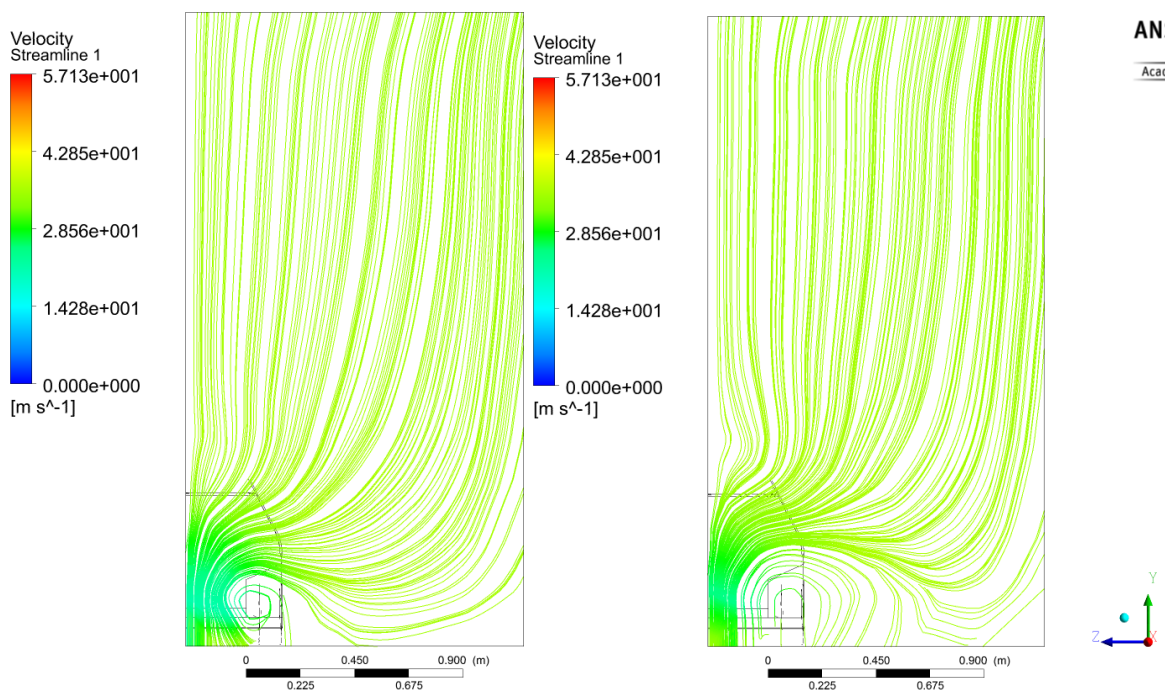


Fig. 6.36. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 3 y 4.

6.7. Aumento de la carga aerodinámica

Para corroborar los resultados obtenidos y lo aprendido hasta ahora, se ha decidido hacer una última prueba con el objetivo de aumentar la carga aerodinámica. Este paso sería útil en el caso de que el coche fuese de competición y tuviera que soportar altas velocidades. Se ha decidido modificar tanto la altura del vehículo como el spoiler posterior. En cuanto a la altura del vehículo se ha decidido modificar la altura del spoiler delantero y de los faldones laterales de 45 mm por otros de 50 mm. En cuanto al spoiler trasero, se ha decidido modificar el actual del 8% de cuerda por uno del 5% y con dirección horizontal en vez de seguir la dirección tangencial de la unión del techo con el parabrisas trasero, como se observa en la Fig. 6.37.

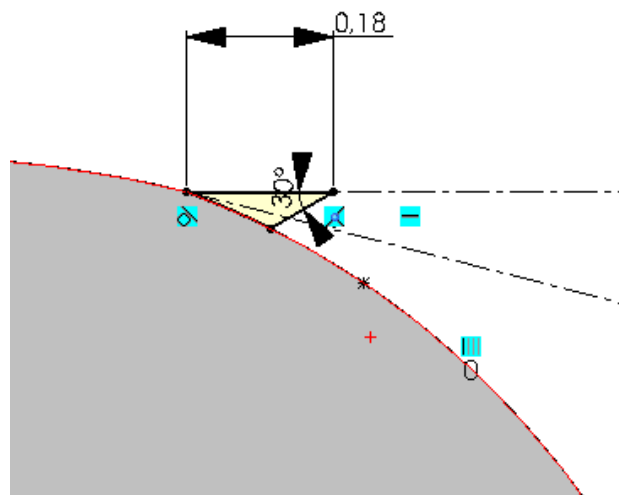


Fig. 6.37. Croquis del spoiler trasero modificado.

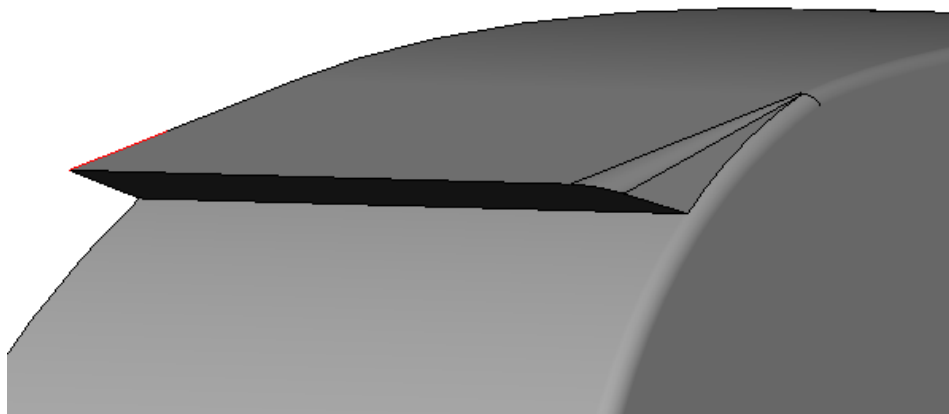


Fig. 6.38. Geometría del spoiler trasero modificado.

A continuació se presenta una taula comparativa de resultats del vehicle amb major càrrega aerodinàmica en comparació amb el vehicle amb les millores aerodinàmiques introduïdes i amb el model de sèrie. Les simulacions s'han dut a terme a una velocitat de 35 m/s. A més, l'àrea projectada frontal ha augmentat a 0,2719 m².

	C_D	C_L	C_M	C_L/C_D	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	F_D [N]	F_L [N]	M [N·m]
Original	0,4059	0,1232	0,1968	0,3036	0,1026	0,0311	75,3896	22,8825	63,9670
Con mejoras	0,3837	-0,0693	0,1354	0,1806	0,1043	-0,0188	76,6529	-13,8443	47,3362
Mayor carga	0,3917	-0,2136	0,0283	0,5453	0,1065	-0,0580	78,2799	-42,6872	9,8974
Variación*	3,50%	-273,38%	-85,62%	79,61%	3,80%	-286,49%	3,83%	-286,55%	-84,53%

Tabla 6.8. Resultados del modelo con mayor carga aerodinámica.

*Variación del modelo con mayor carga respecto al modelo original.

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar como en este caso, a pesar de no reducir el C_D , si que se ha reducido enormemente el valor de C_L . De esta forma se observa como se ha incrementado en aproximadamente un 80% la eficiencia aerodinámica respecto al modelo original. Por el contrario, se ha aumentado el valor de la fuerza total de resistencia al avance pero en tan solo un 4%. En un automóvil de carreras o incluso en un turismo de serie de tipo sport, asegurar la maniobrabilidad i la estabilidad a favor de ganar tan solo un 4% de resistencia al avance, se puede considerar un hecho favorable. Además, si se observa por un momento el valor del momento de cabeceo, se observa como en el modelo con mayor carga aerodinámica, este valor se ha reducido considerablemente y se podría decir que con las últimas modificaciones aplicadas, el vehículo se encontraría estabilizado con una distribución de fuerzas bastante semejante en ambos ejes. La visualización de los resultados se asemeja a la de los casos anteriores y se puede encontrar en el anexo D.

7. Planificación temporal y presupuesto

A continuación se presenta la distribución temporal dedicada a las diversas fases y etapas del proyecto, así como los costes derivados de su realización.

7.1. Planificación temporal

La duración del proyecto ha consistido en un total de 16 semanas, empezando la tercera semana de Septiembre del 2016 y finalizando el proyecto la primera semana de Enero del 2017. La planificación se muestra en la siguiente figura:

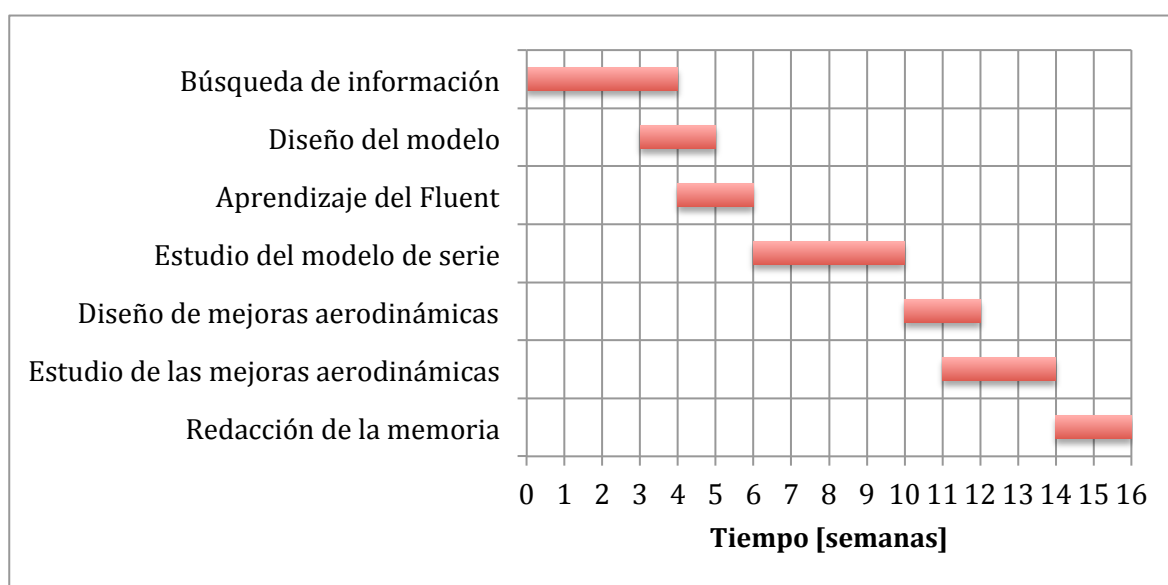


Fig. 7.1. Planificación temporal del proyecto.

Se puede observar como a lo largo del proyecto, algunas de las actividades se han ido desarrollando en paralelo para, agilizar el proceso y porque son complementarias, como son las búsqueda de información mientras se diseña el modelo, la realización de las primeras pruebas en *Fluent* mientras se termina de diseñar el modelo haciendo pruebas o el diseño de las mejoras aerodinámicas mientras se van haciendo las primeras pruebas con dichos diseños.

Se debe tener en cuenta que dentro de actividades como el diseño del modelo de serie y de las modificaciones, el estudio del modelo de serie y el estudio de las modificaciones, pueden haber surgido problemas en cuanto al diseño o la simulaciones llevadas a cabo que han provocado que estas fases se hayan

alargado. Se puede observar en la Fig. 7.1 como las fases más largas han sido el proceso de búsqueda de información, debido a la gran cantidad de información disponible en el campo de la automoción, y las fases de estudio del modelo de serie y con las modificaciones debido al gran número de simulaciones llevadas a cabo, tanto buenas como simulaciones erróneas.

7.2. Planificación presupuestaria

El presupuesto del proyecto se ha calculado teniendo en cuenta cuatro factores: ingeniería, software, consumo eléctrico y amortización.

En cuanto a la parte de la ingeniería, representa el coste de los honorarios de un ingeniero (8€/h) contratado para realizar este proyecto, trabajando a media jornada (4h) durante las 16 semanas que ha durado el proyecto. Para calcular los honorarios se ha tenido en cuenta que se ha trabajado una media de 20 horas semanales. Lo que suma un total de 304 horas trabajadas.

Los costes del software es la parte más costosa (más de un 60%) ya que contempla la adquisición de las licencias de los programas que se han utilizado a lo largo del proyecto. Estas licencias se han contratado por un periodo de un año, debido a que cada año salen actualizaciones y es el periodo de contratación mínimo. Por lo tanto, a la hora de calcular el presupuesto, se tiene en cuenta un factor que es el porcentaje de uso de estas licencias, que representa los 4 meses de duración aproximada del proyecto. En definitiva los programas utilizados son:

- Paquete ofimático MS Office para la realización de la memoria.
- Licencia académica de ANSYS Workbench 16.2, donde se encuentra el software Fluent.
- Licencia del programa de diseño Solidworks 2016.

Para hacer el cálculo del coste energético consumido, se tienen en cuenta lo gastado por el uso del ordenador y de la luz consumida. Para el ordenador se ha utilizado la potencia máxima del transformador (90W) a lo largo de toda la duración del proyecto, considerando un precio de la luz de 0,15 €/kWh [11]. Para el cálculo de la luz consumida se ha tenido en cuenta una iluminación tipo LED de 20W de potencia a lo largo de todo el proyecto. En este apartado se observa la gran diferencia que existe entre las simulaciones llevadas a cabo con ordenador y las llevadas a cabo en un túnel de viento, donde el consumo energético de un túnel de viento es inmensamente superior.

Por último, el cálculo de la amortización consiste en los años de vida que puede tener el ordenador usado, debido a que el ordenador no se compra para la realización del proyecto y luego se tira, sino que sirve para la realización de otros proyectos. Además se tiene en cuenta el porcentaje de uso anual que se hace de él durante el proyecto. La amortización del ordenador se considera de 5 años de vida respecto del coste total de adquisición [12].

A continuación se presenta una tabla del presupuesto total del proyecto desglosado en sus partes y un diagrama tipo pastel del coste del proyecto.

Gastos de ingeniería			
Concepto	Precio por hora	Tiempo	Total (1)
Honorarios	8 €/h	304 h	2.432 €

Tabla 7.1. Gastos de ingeniería.

Gastos de software			
Concepto	Precio de adquisición	Porcentaje de uso	Total
MS Office	69 €	33,33%	23 €
Ansys Workbench 16.2	26.400 €	33,33%	8.800 €
SolidWorks 2016	6.600 €	33,33%	2.200 €
Total (2)			11.023 €

Tabla 7.2. Gastos de software.

Consumo eléctrico				
Concepto	Potencia	Tiempo de uso	Precio	Total
Ordenador	0,090 kW	304 h	0,15 €/kW·h	4,10 €
Iluminación	0,02	304 h	0,15 €/kW·h	0,91 €
Total (3)				5,01 €

Tabla 7.3. Gastos de consumo eléctrico.

Amortización				
Concepto	Precio adquisición	Coefficiente de amortización	Porcentaje de uso	Total (4)
Ordenador	953,98 €	0,2	33,33%	63,59 €

Tabla 7.4. Gastos de amortización.

Costes totales		
Concepto	Fórmula	Total
Coste total	(1) + (2) + (3)	13.460,01 € (5)
Imprevistos	5% de (5)	673 € (6)
Total antes de impuestos	(5) + (6)	14.133,01 € (7)
I.V.A.	21% de (7)	2.967,93€ (8)
Total después de impuestos	(7) + (8)	17.100,94 € (9)
Coste total de proyecto	(4) + (9)	17.164,53 €

Tabla 7.5. Costes totales.

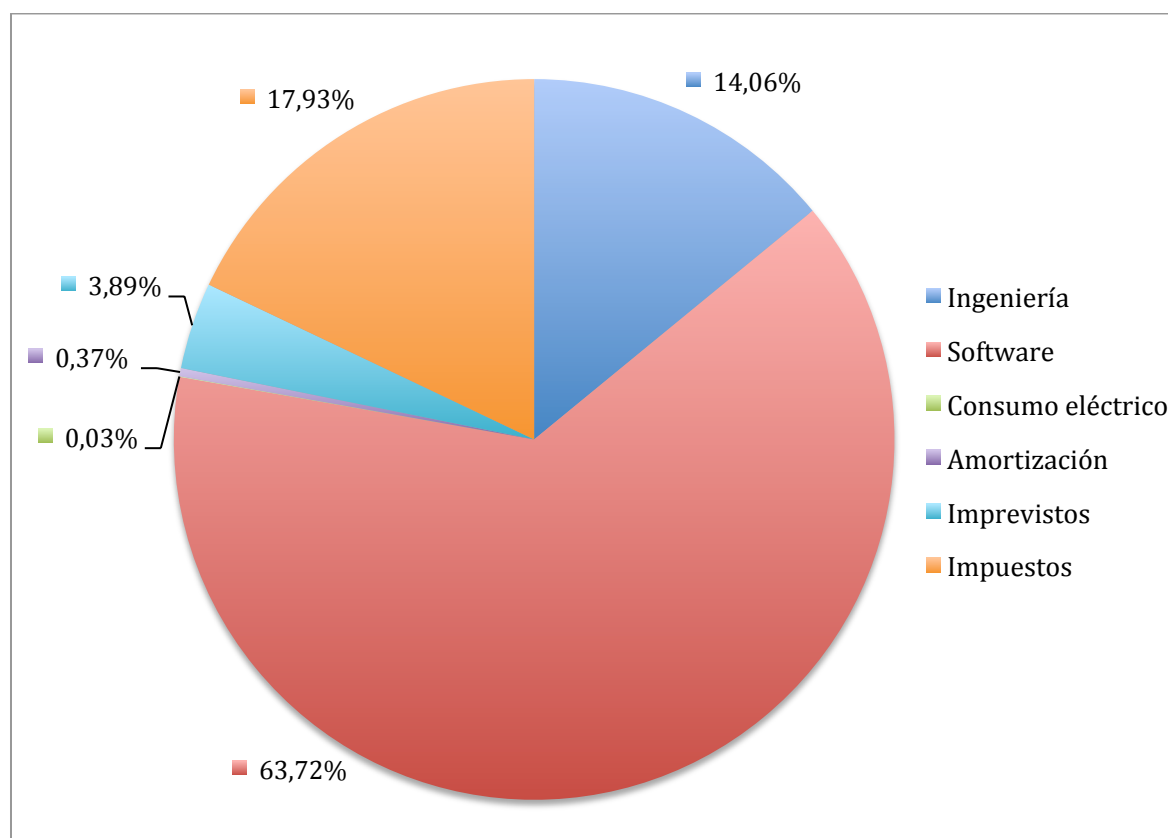


Fig. 7.2. Diagrama de gastos del proyecto.

8. Impacto ambiental

Debido a que el proyecto es meramente teórico y se ha llevado a cabo íntegramente con el uso de ordenador, no es necesario un estudio de impacto ambiental. Pero lo que sí se consigue con la realización de este proyecto, en el caso de que se quisieran implementar las mejoras aerodinámicas expuestas, es una reducción tanto del consumo energético como económica, en comparación con estudios de túneles de viento y una reducción del coste, del consumo de combustible y de contaminación, reduciendo el número de pruebas en circuito cerrado necesarias.

El uso de técnicas de CFD, permite a las compañías automovilísticas sobretodo, el abaratamiento de costes, debido a que con su uso, no se necesitan tantas pruebas en túneles de viento y, con ello, no tienen la necesidad de tener un túnel de viento propio, cuya construcción supone una gran cantidad de dinero, y pueden simplemente alquilar uno cuando haga falta para las pocas simulaciones que se requieran.

Finalmente, tener que realizar menos pruebas en circuito cerrado, supone tanto menos horas del alquiler del circuito, como menos kilómetros recorridos, consiguiendo así reducir el coste del proyecto y de combustible. De esta forma, se contamina menos por la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y por el ruido.

9. Conclusiones

En la realización de este proyecto se puede afirmar que se han alcanzado los objetivos previstos. Primero de todo se ha estudiado la aerodinámica de un turismo de serie, obteniendo las fuerzas que actúan sobre él y como se comporta el flujo a su alrededor. Posteriormente se ha hecho un estudio de mejora de su aerodinámica con apéndices aerodinámicos donde se ha podido conseguir una mejora en la eficiencia aerodinámica del 75% con una reducción de la fuerza de sustentación total de hasta el 280% con tan solo un aumento del 3% en la fuerza de resistencia al avance total.

Otro objetivo que se ha cumplido ha sido el de entender como afectan las diversas zonas del vehículo en el flujo y en la aerodinámica tanto de forma local como en su totalidad, y como con pequeñas variaciones en la altura del coche, añadiendo un pequeño spoiler trasero y un difusor, se consiguen tan buenos resultados.

Además, para lograr obtener los resultados, se han alcanzado las capacidades suficientes para manejarse con el programa de diseño SolidWorks, para poder diseñar tanto la geometría del vehículo, como de todas las mejoras implementadas. Por otra, también se ha alcanzado el nivel suficiente de uso del programa Fluent para llevar a cabo todas las simulaciones i visualizar los resultados de una forma correcta.

Una vez realizado el proyecto, el siguiente paso en la investigación de la aerodinámica del turismo sería el de realizar un maqueta del modelo a escala para realizar estudios en un túnel de viento y comprobar que todos los resultados obtenidos se corresponden con la realidad.

Para finalizar, se extrae de este proyecto dos objetivos en los que trabajar en un futuro, que serian el de la geometría y el del mallado. En cuanto a la geometría se podría trabajar con una geometría a escala real del modelo, sin ninguna reducción de superficies y con todos los detalles y complementos de un vehículo real. Por otra parte, otro objetivo a cumplir para obtener unos resultados más fiables en comparación con la realidad, seria el de disponer de una licencia profesional del programa, también con un ordenador más potente capaz de realizar los cálculos, para poder realizar un mallado en condiciones, mucho más eficiente, con unos elementos finitos mucho más pequeños.

10. Bibliografía

10.1. Bibliografía de Imágenes

Fig. 4.1 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 62.

Fig. 4.2. Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 3.

Fig. 4.3. Carme Valero, Apunts d'Aerodinàmica de l'ETSEIB, Espanya: 2016, capítol 6.

Fig. 4.4 ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics* (3rd Edition). New York, NY: 2001, pág. 29.

Fig. 4.5

[[http://the-contact-patch.com/figure/C1416-Streamlines-1423780583.jpg?transform=\[rs%3A590|600|f\]](http://the-contact-patch.com/figure/C1416-Streamlines-1423780583.jpg?transform=[rs%3A590|600|f]) ,

20 de Diciembre de 2016]

Fig. 4.6 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 49.

Fig. 4.7 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 53.

Fig. 4.8 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 55.

Fig. 5.1 Simon McBeath, *Aerodinàmica del automòvil de competició*, 1º Edición, Traducción de Pablo Elizalde y Orlando Ríos, España: 2000, pág. 161.

Fig. 5.26 Carme Valero, Apuntes de Aerodinàmica de la ETSEIB, España: 2016, capítulo 6.

Fig. 5.27 Carme Valero, Apuntes de Aerodinàmica de la ETSEIB, España: 2016, capítulo 6.

Fig. 6.2 Francisco Izquierdo, *Teoría de los vehículos automóviles*. España, Universidad politécnica de Madrid, 2001. 2ª edición, pág. 158.

Fig. 6.7 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 174.

Fig. 6.17 Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 143.

Fig. 6.22 MCBEATH, SIMON. *Aerodinàmica del vehículo de competición* (1a Edición).

Sparkford, England: 2000, pág. 76.

Fig. 6.23 MCBEATH, SIMON. Aerodinámica del vehiculo de competición (2a Edición).

Sparkford, England: 2005, pag. 70.

Fig. 6.24 MCBEATH, SIMON. Aerodinámica del vehiculo de competición (2a Edición).

Sparkford, England: 2005, pag. 118.

10.2. Referencias bibliográficas

[1] [<https://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php> , 12 de Octubre del 2016]

[2] Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 196 – 198.

[3] Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 150.

[4] Carme Valero, Apunts d'Aerodinàmica de l'ETSEIB, Espanya: 2016, capítol 27.

[5] Carme Valero, Apunts d'Aerodinàmica de l'ETSEIB, Espanya: 2016, capítol 28.

[6] Simon McBeath. Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición).

Sparkford, England: 2000, pág. 59-60.

[7] Francisco Izquierdo, *Teoría de los vehículos automóviles*. España, Universidad politécnica de Madrid, 2001. 2ª edición, pág. 158.

[8] MCBEATH, SIMON. Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición).

Sparkford, England: 2000, pág. 53-4.

[9] Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 174.

[10] Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles*, England: 1987, pág. 143-144.

[11] [<http://tarifasgasluz.com/faq/precio-kwh>], 2 de Enero del 2017.

[12] [<http://store.hp.com/SpainStore/Default.aspx>] 2 de Enero del 2017.

10.3. Bibliografía complementaria

[1] [<https://www.cfd-online.com>]

[2] Wolf-Heinrich Hucho. *Aerodynamics of Road Vehicles*. England: 1987

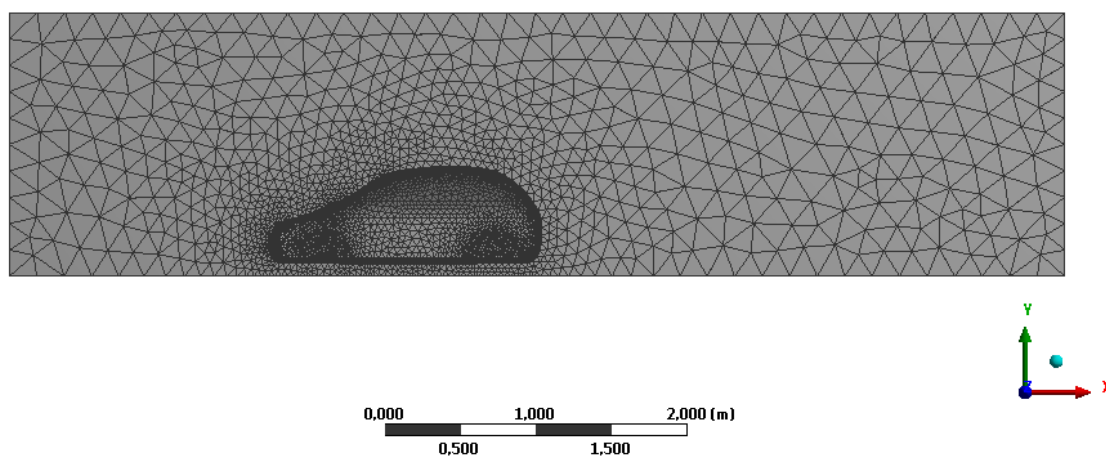
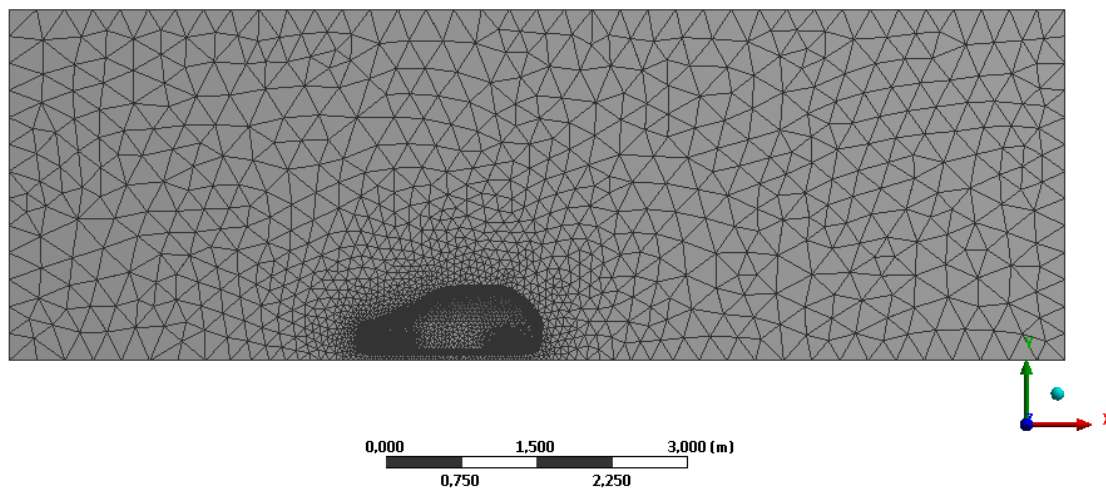
[3] MCBEATH, SIMON. Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición).

Sparkford, England: 2000.

[4] Carme Valero. *Apuntes de Aerodinámica*. Universidad Politécnica de Cataluña, ETSEIB. España, 2016.

11. Anexos

A. Optimización del dominio de control y del mallado



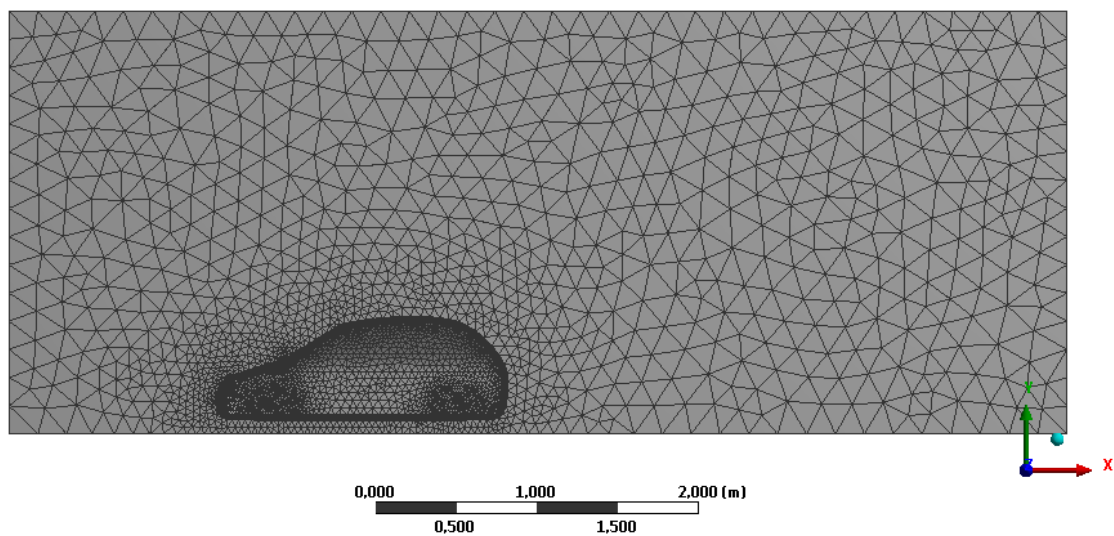


Fig. 11.3 Dominio de control 3.

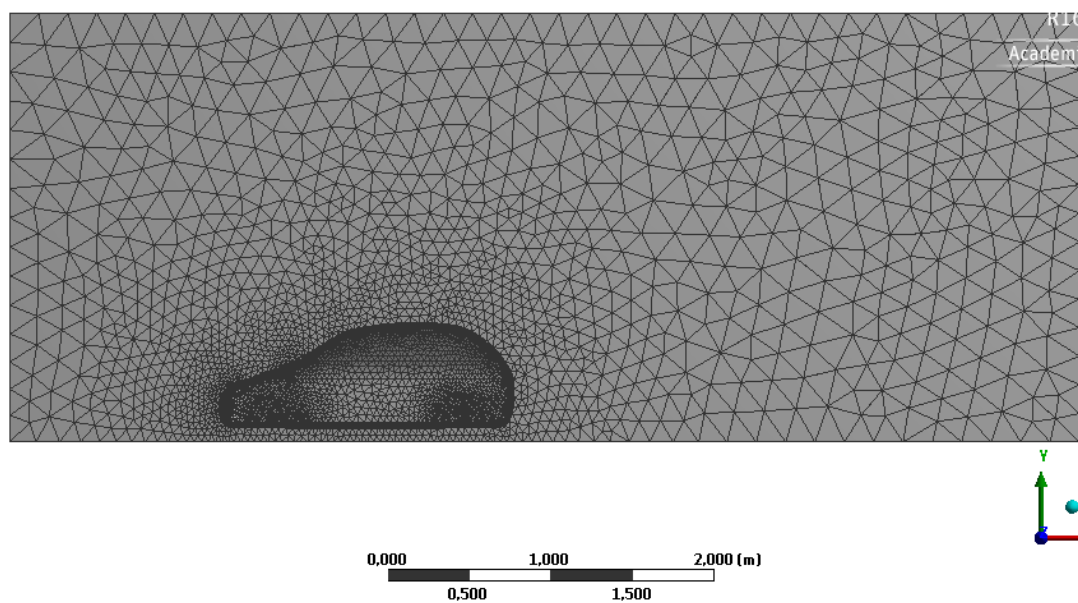


Fig. 11.4. Dominio de control 4.

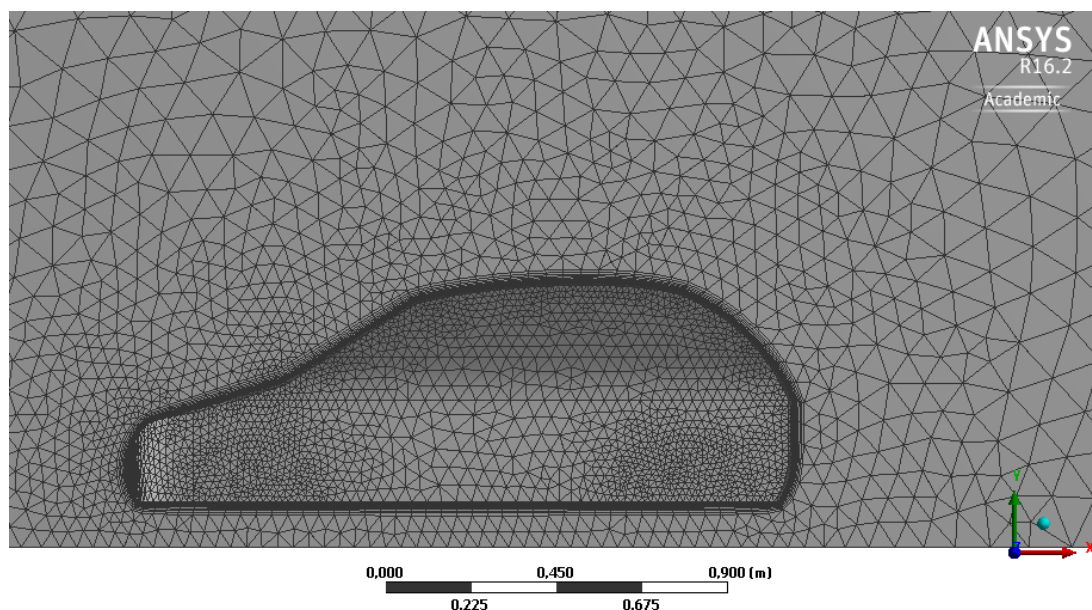


Fig. 11.5. Malla del dominio 4 ampliada.

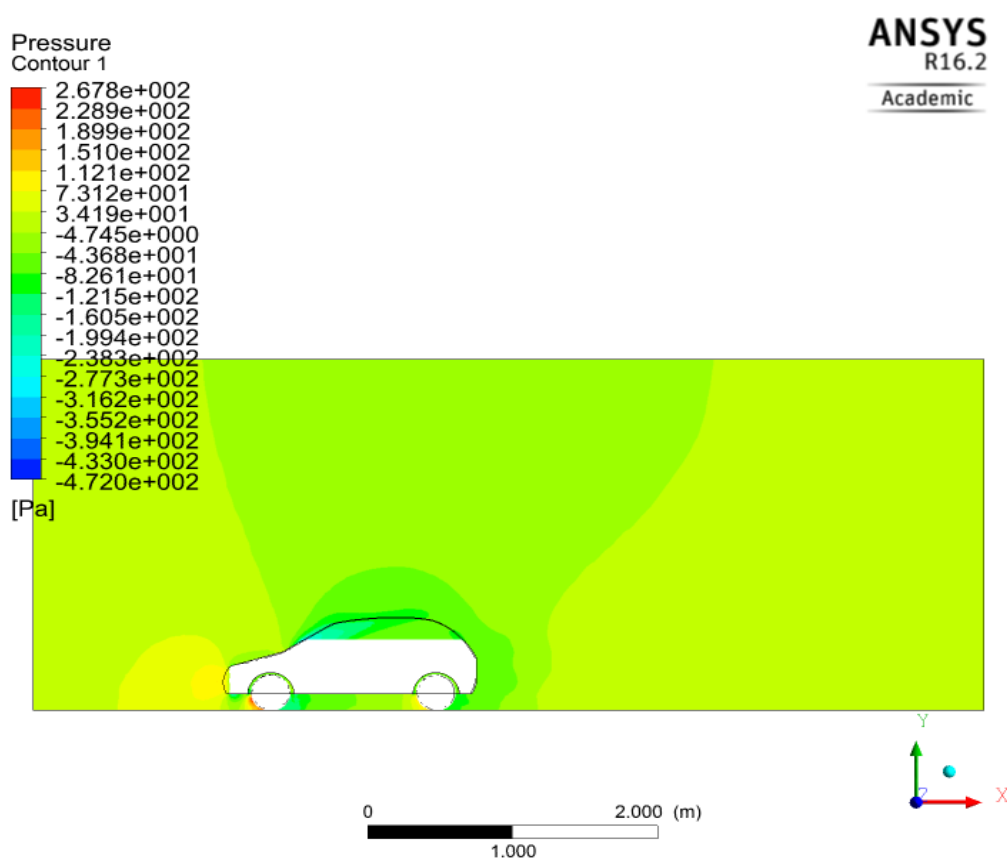


Fig. 11.6. Distribución de presiones del dominio 4 en el plano de perfil de las ruedas.

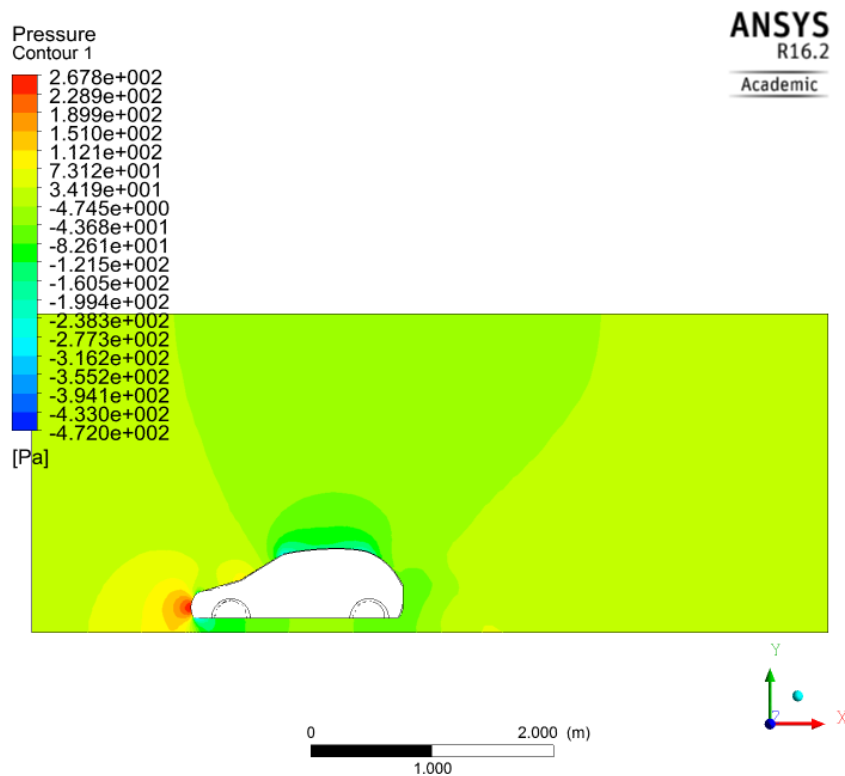


Fig. 11.7. Distribución de presiones del dominio 4 en el plano de simetría.

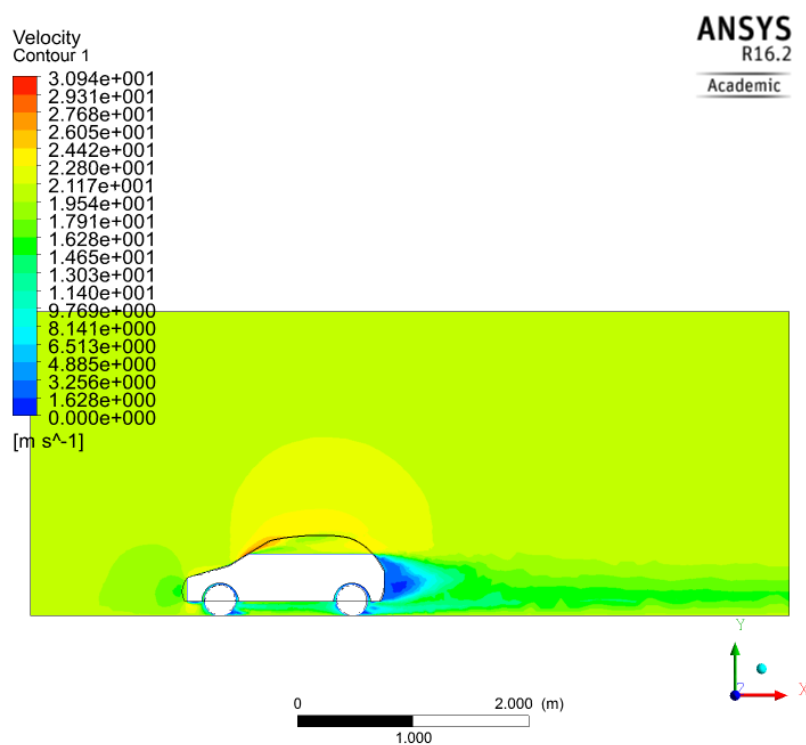


Fig. 11.8. Distribución de velocidades del dominio 4 en el plano de perfil de las ruedas.

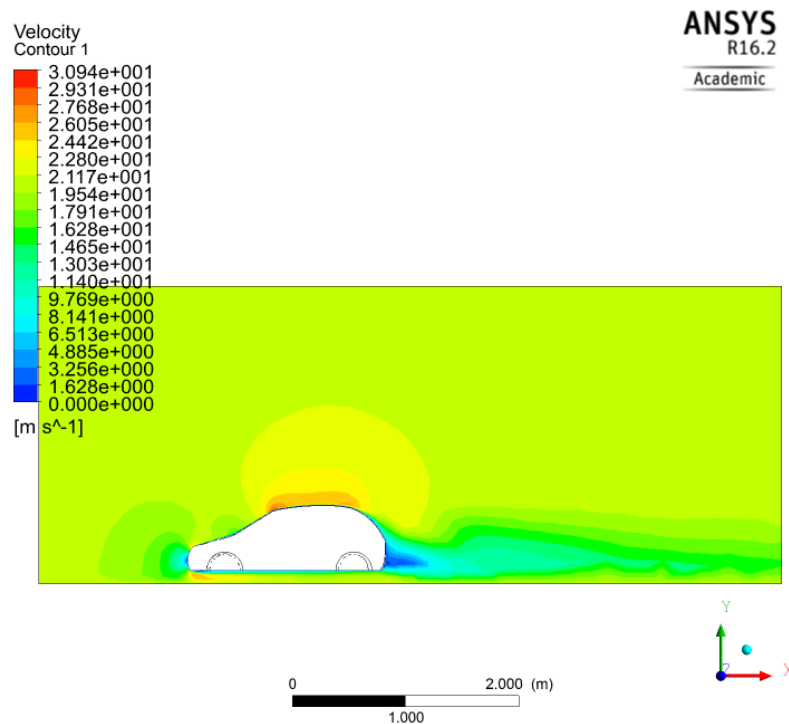


Fig. 11.9. Distribución de velocidades del dominio 4 en el plano de simetría.

B. Visualización de resultados del modelo de serie

- $V = 20 \text{ m/s}$

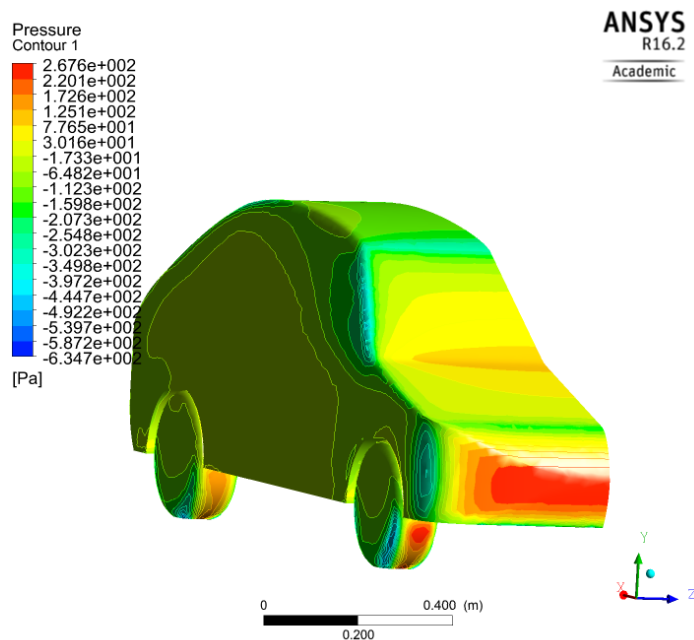


Fig. 11.10. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

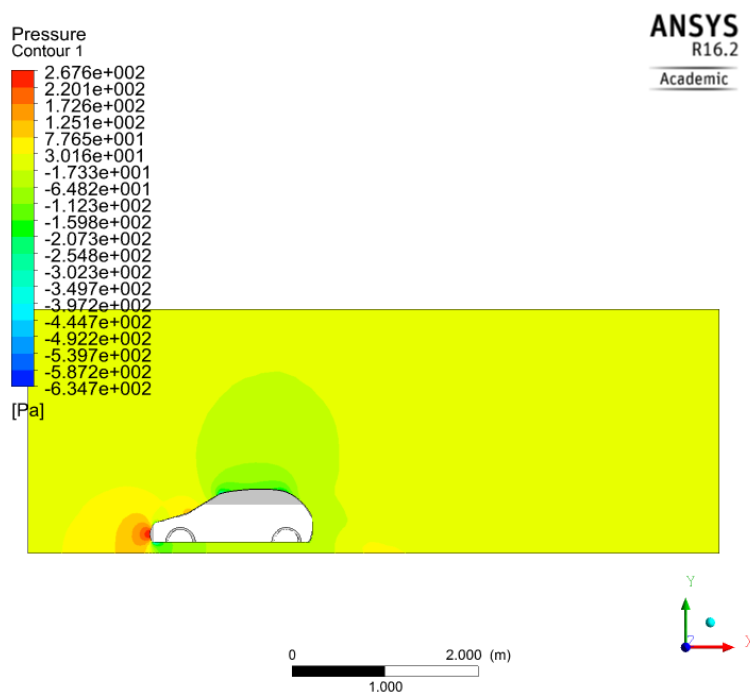


Fig. 11.11. Distribución de presiones en el plano de simetría.

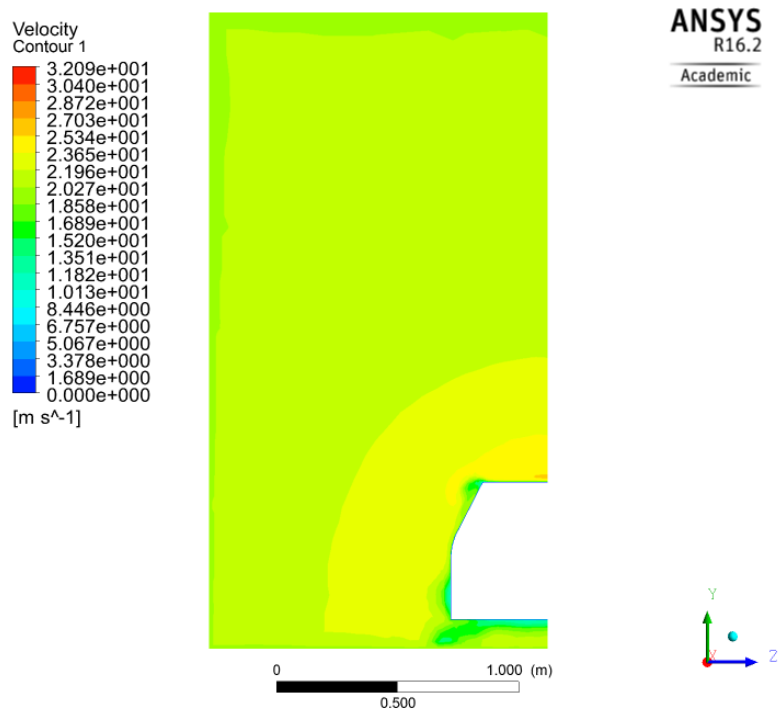


Fig. 11.12. Distribución de velocidades en el plano de visualización de los laterales.

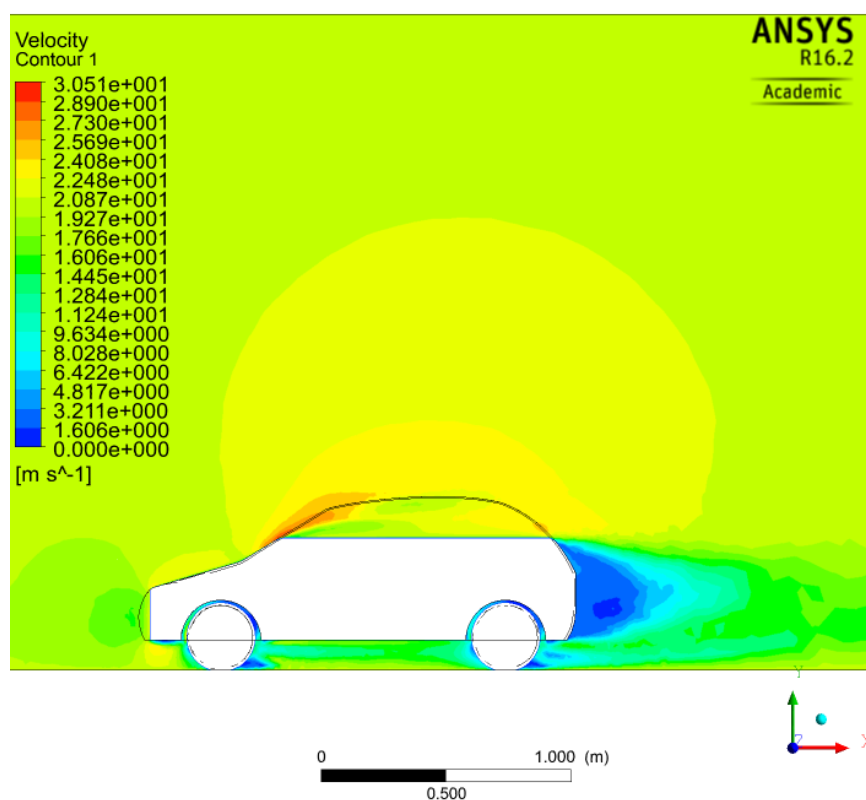


Fig. 11.13. Detalle de la distribución de velocidades en el plano de perfil de las ruedas.

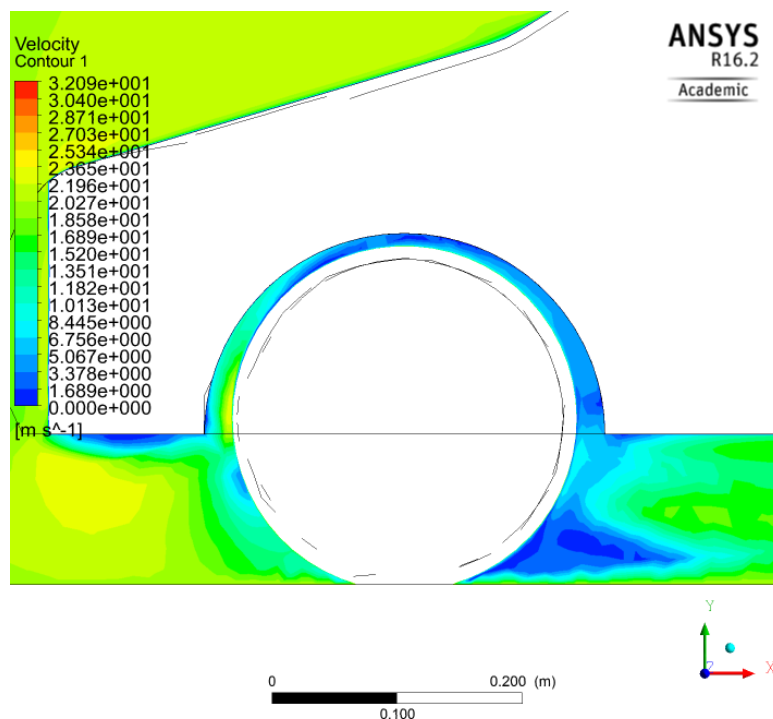


Fig. 11.14. Visualización de la estela generada en la parte delantera.

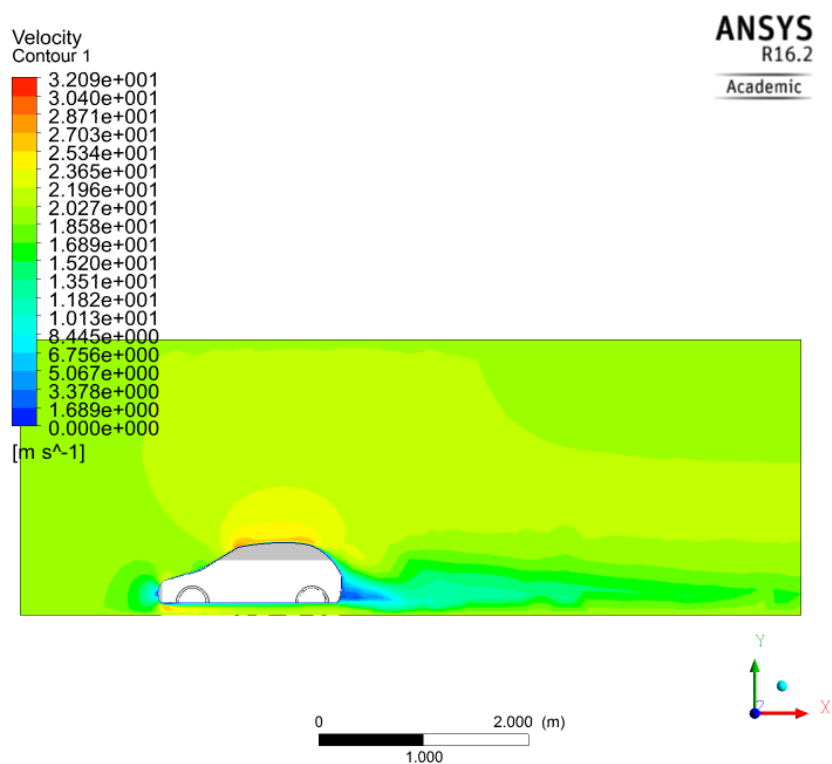


Fig. 11.15. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

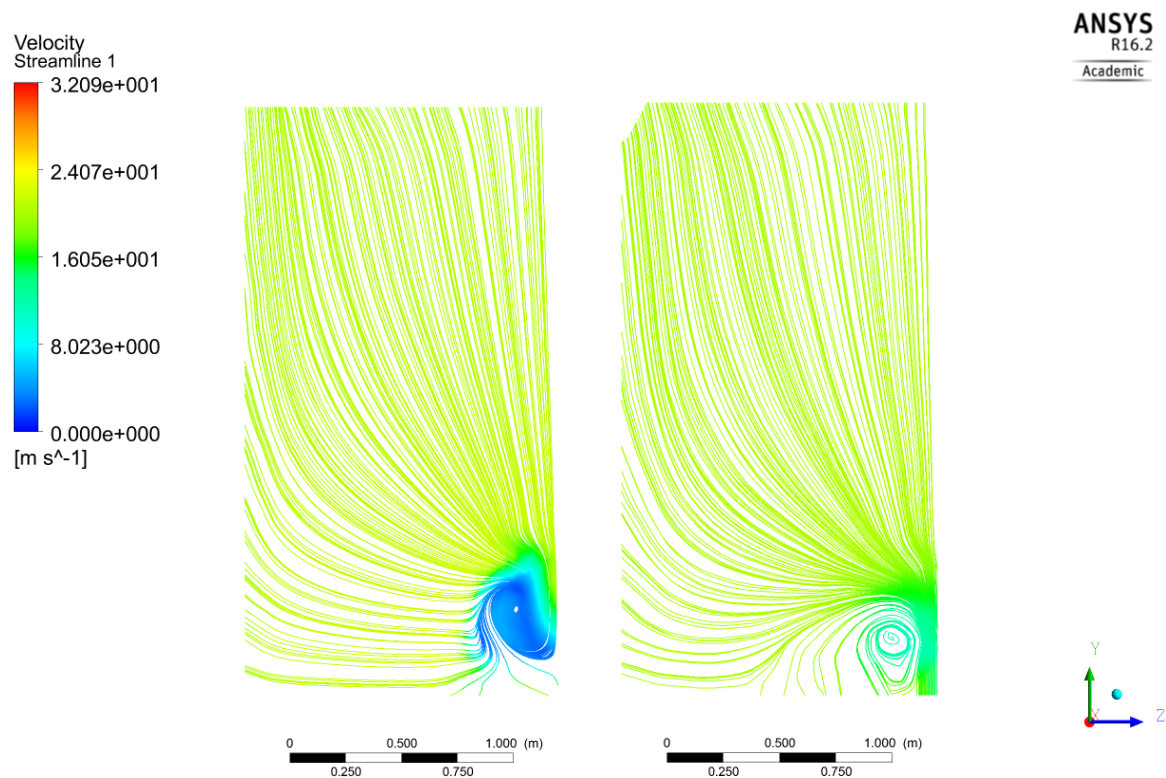


Fig. 11.16. Visualización de la turbulencia generada en los planos de turbulencia 1 y 2.

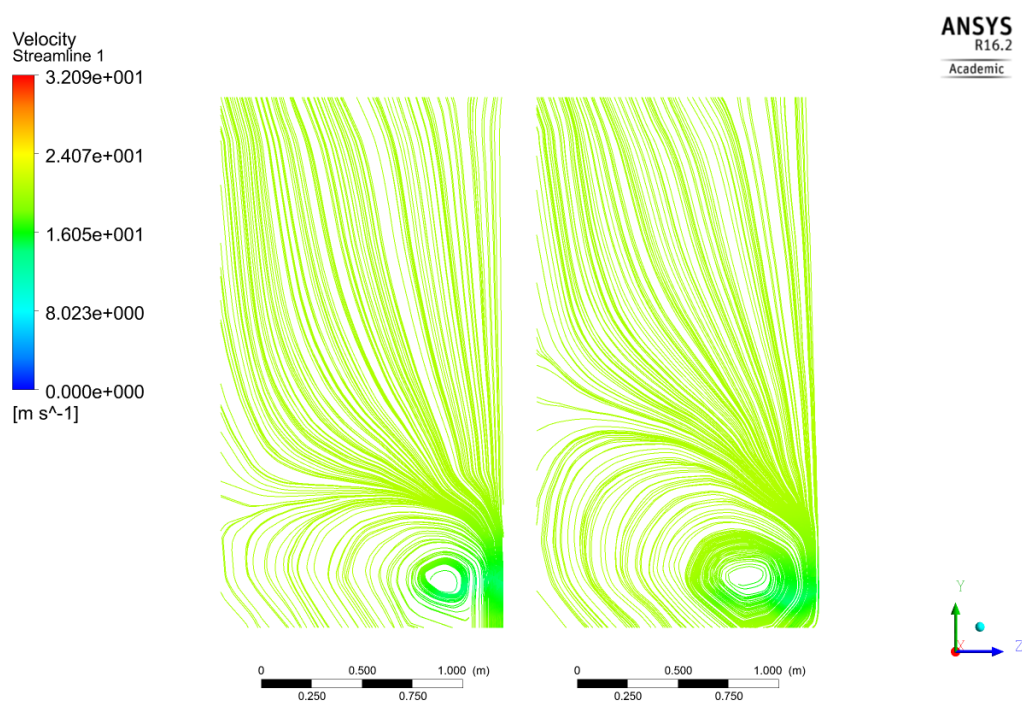


Fig. 11.17. Visualización de la turbulencia generada en los planos de turbulencia 3 y 4.

- $V = 50 \text{ m/s}$

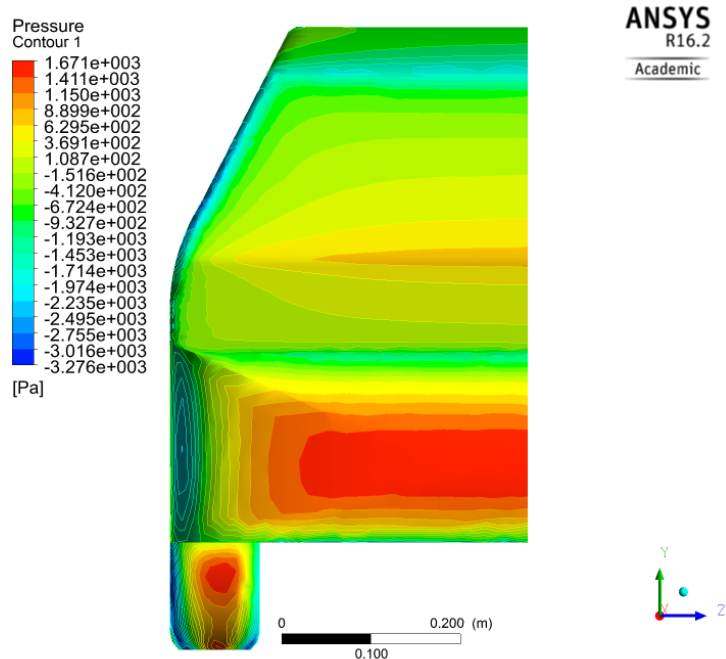


Fig. 11.18. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

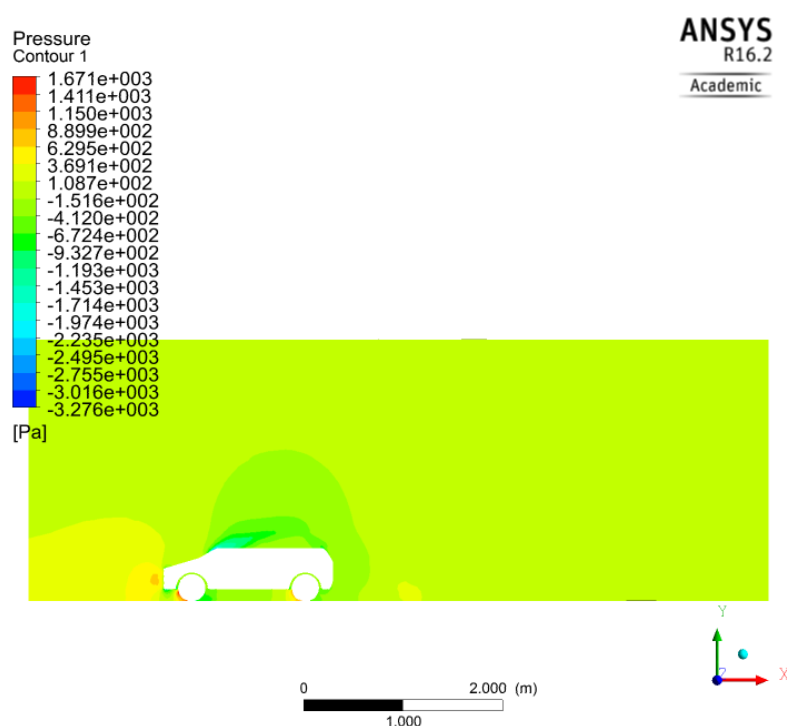


Fig. 11.19. Distribución de presiones en el plano de perfil de las ruedas.

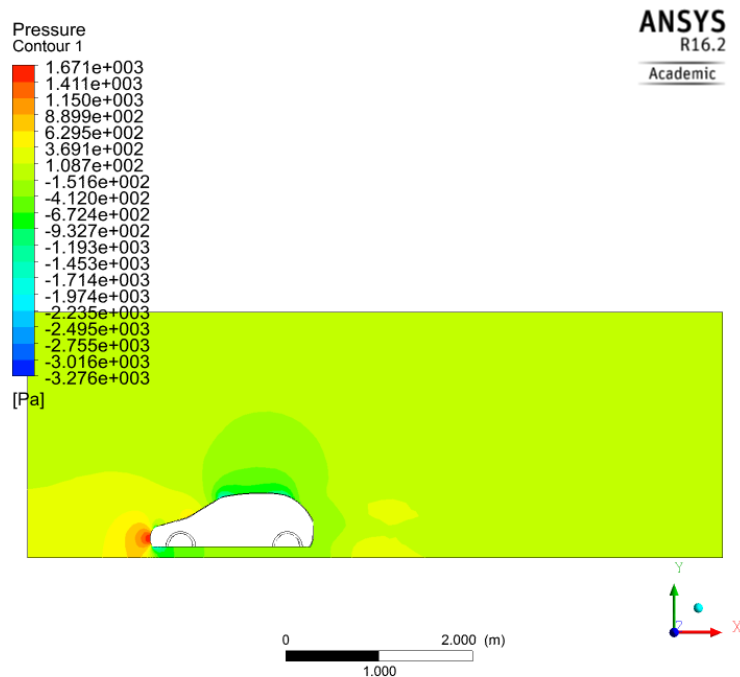


Fig. 11.20. Distribución de presiones en el plano de simetría.

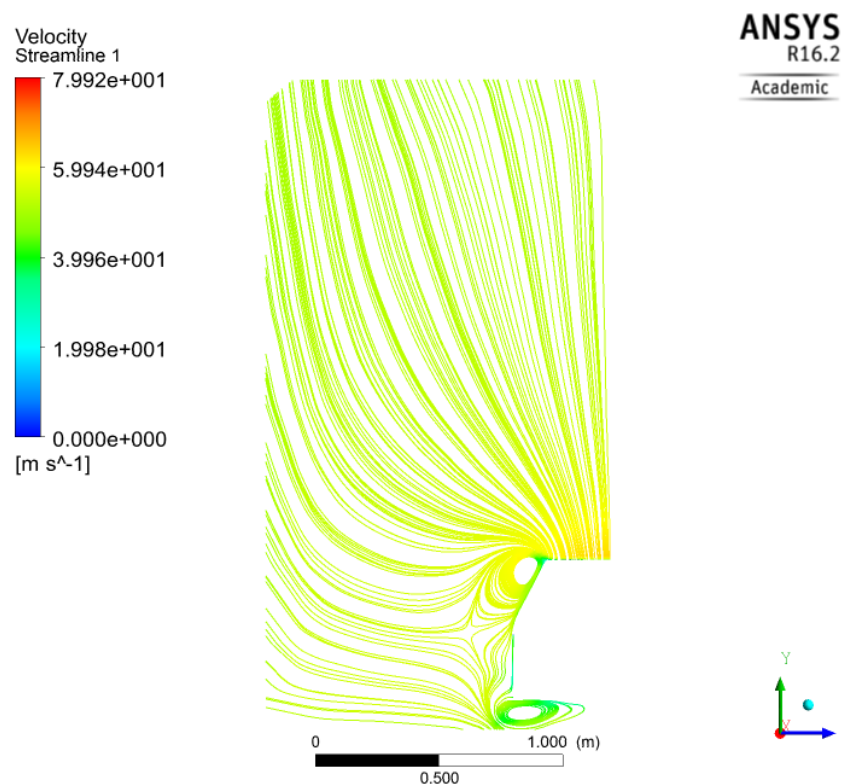


Fig. 11.21. Líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

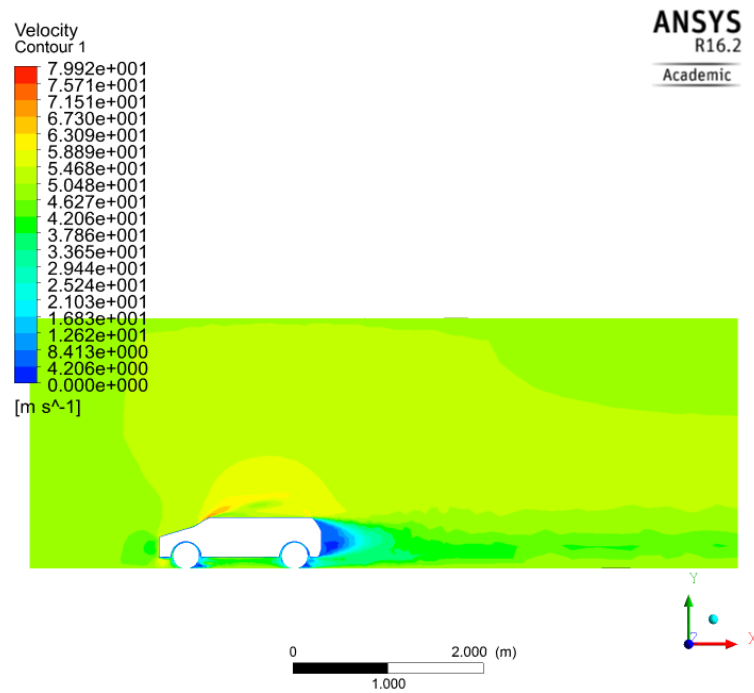


Fig. 11.22. Distribución de velocidades en el plano de perfil de las ruedas

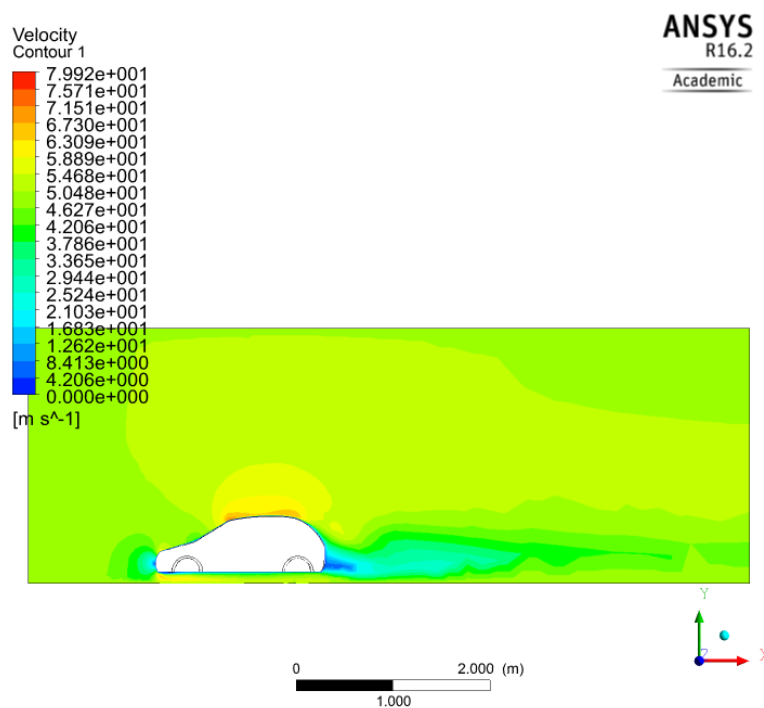


Fig. 11.23. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

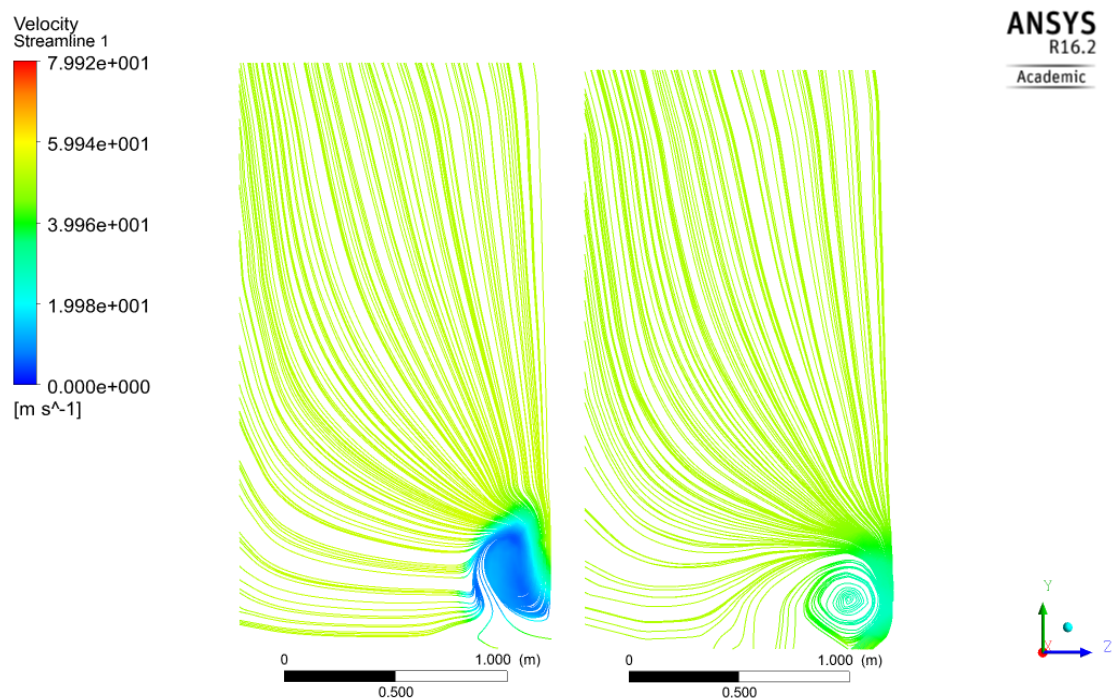


Fig. 11.24. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 1 y 2.

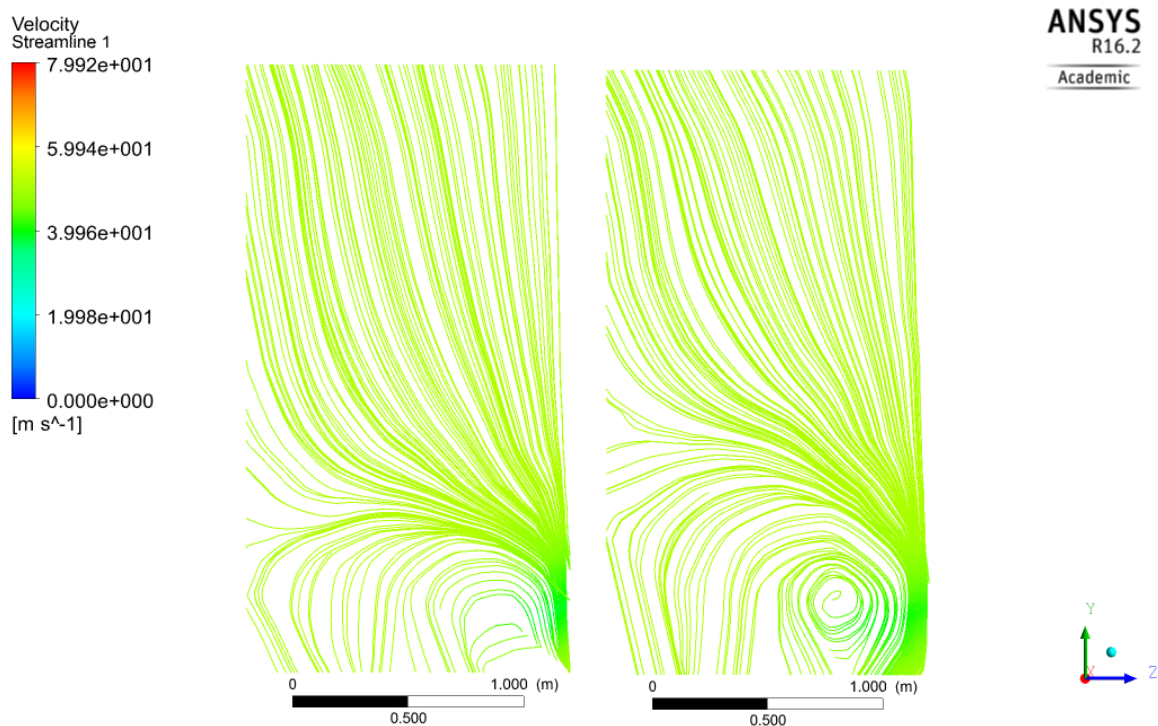


Fig. 11.25. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 3 y 4.

C. Visualización de resultados de mejoras aerodinámicas

- V = 20 m/s

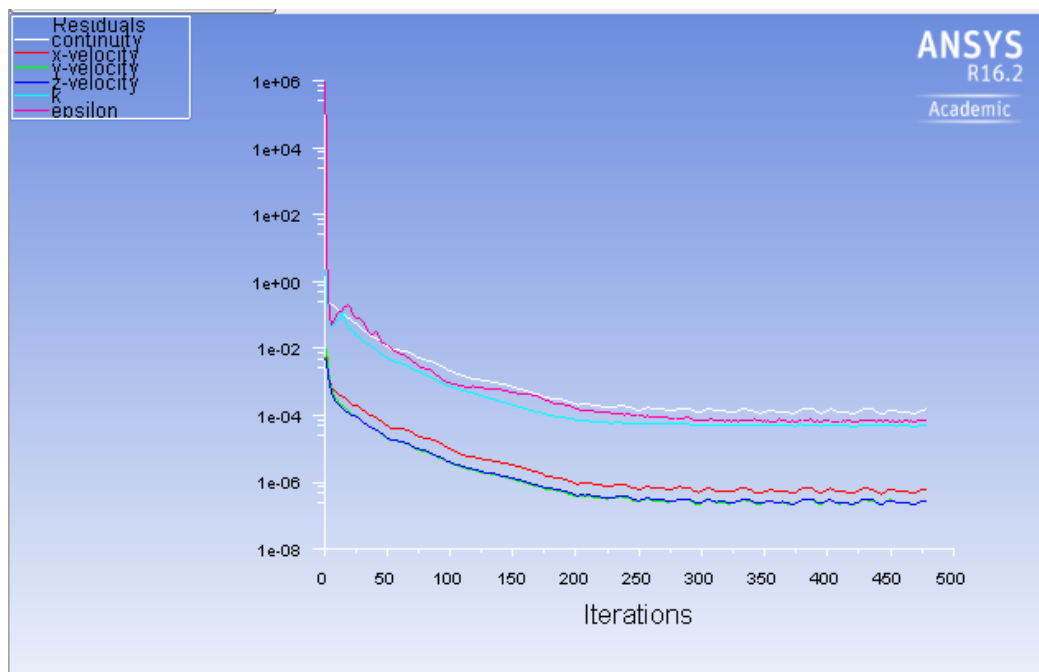


Fig. 11.26. Representación de los residuos.

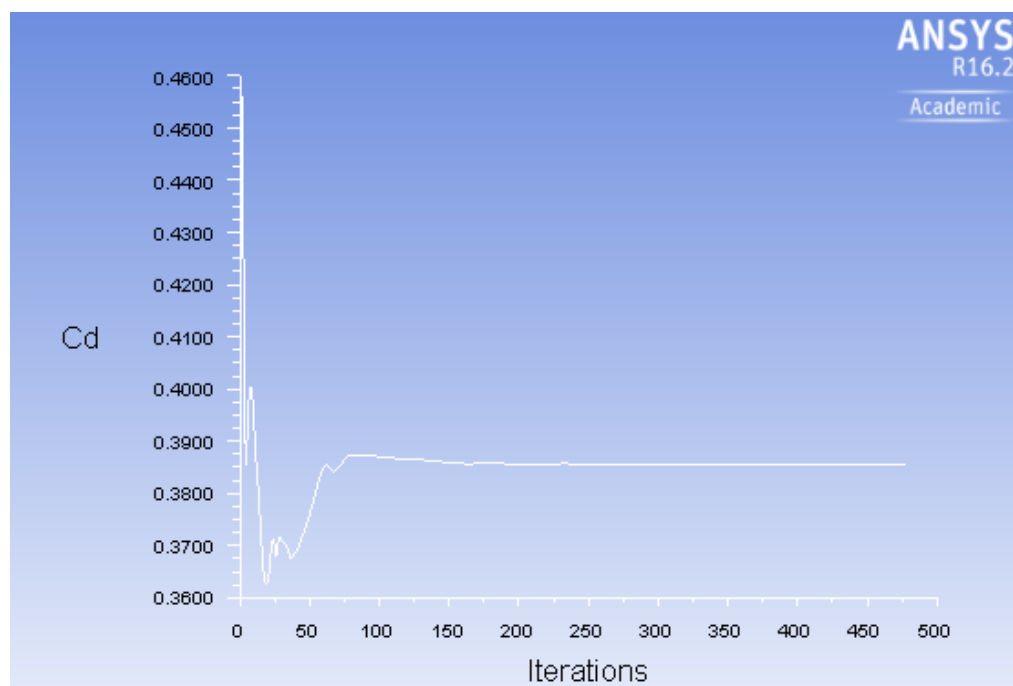


Fig. 11.27. Representación del coeficiente de resistencia al avance.

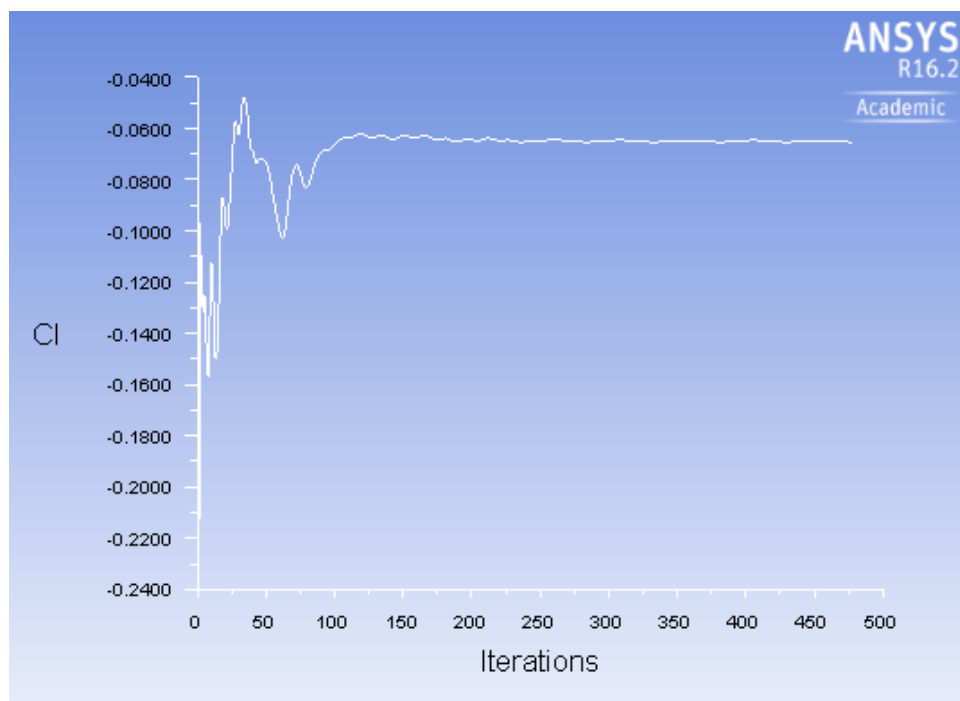


Fig. 11.28. Representación del coeficiente de sustentación.

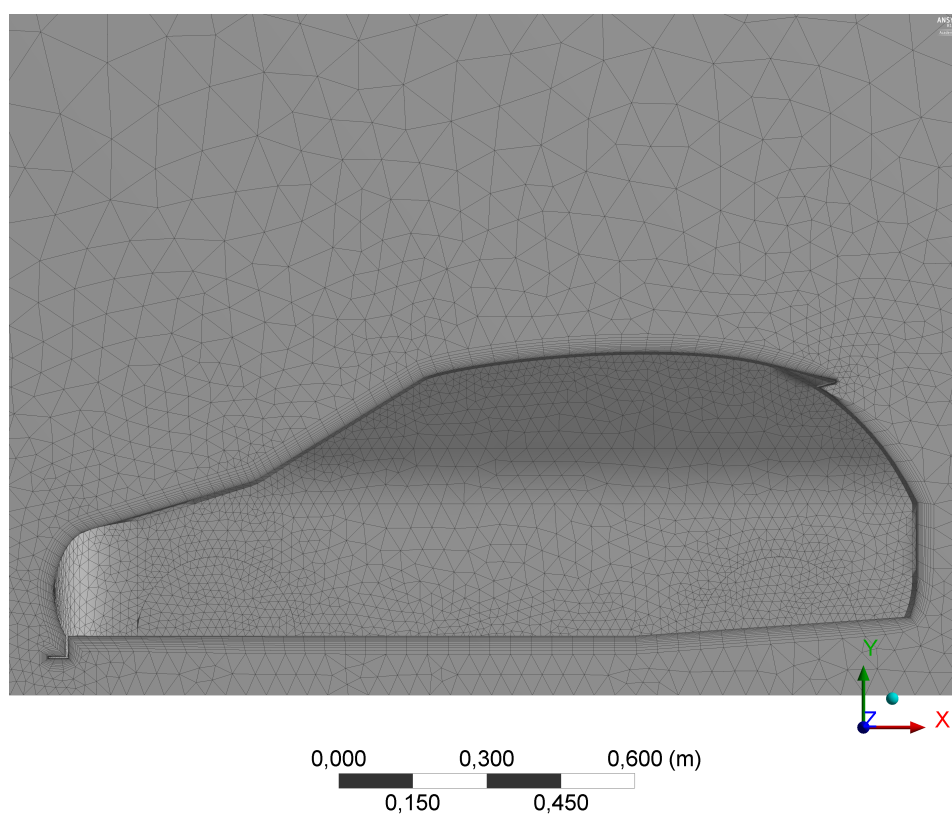


Fig. 11.29. Visualización del mallado alrededor del vehículo.

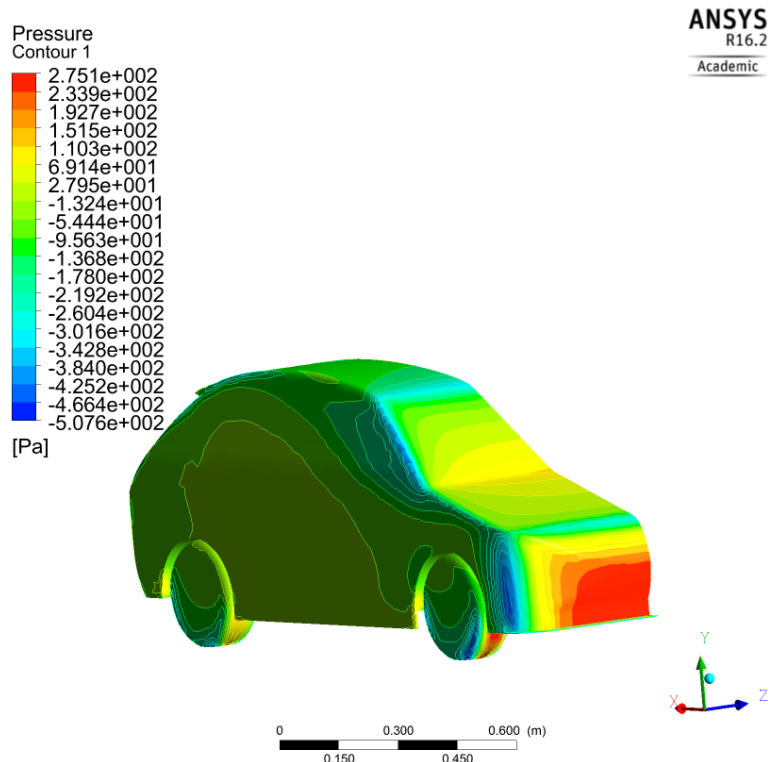


Fig. 11.30. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

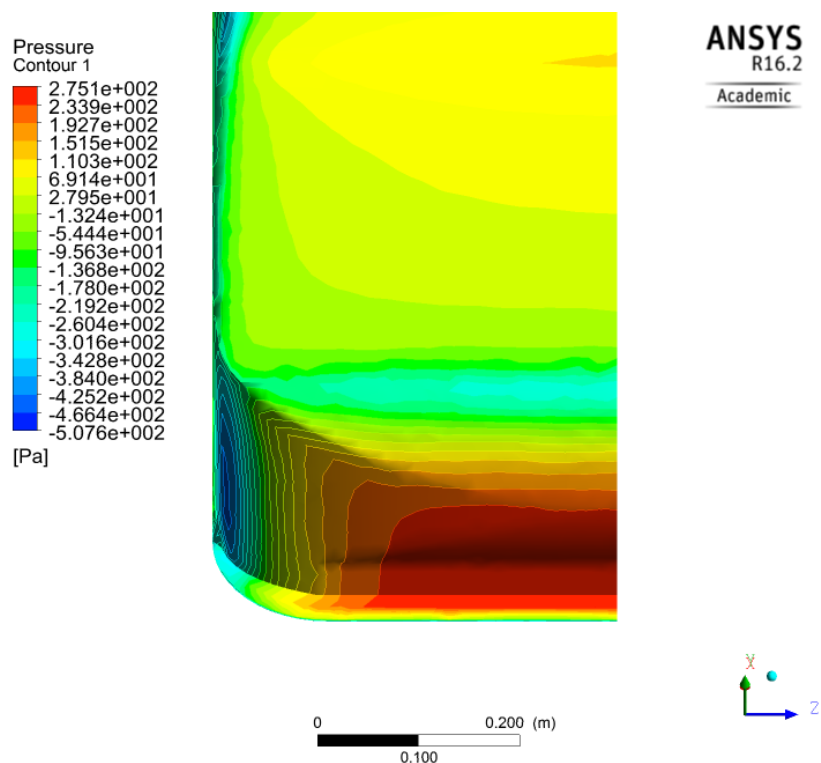


Fig. 11.31. Distribución de presiones en el spoiler delantero.

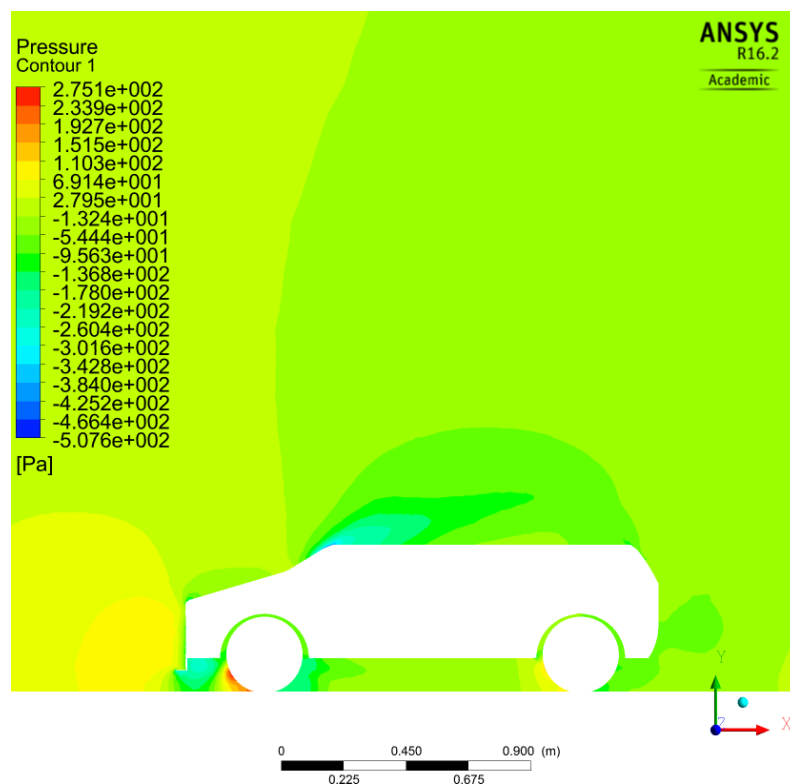


Fig. 11.32. Detalle de la distribución de presiones en el plano de perfil de las ruedas.

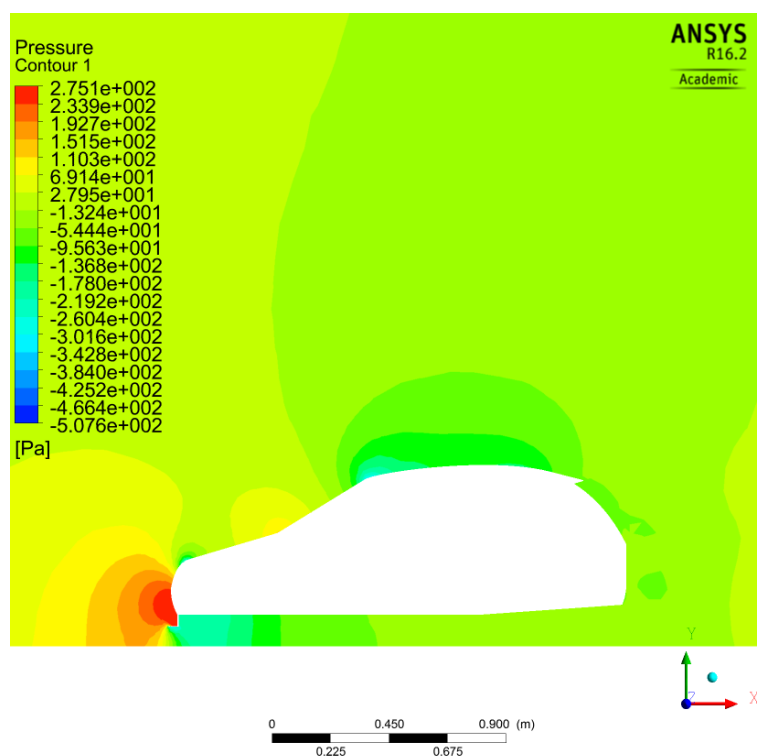


Fig. 11.33. Detalle de las distribución de presiones en el plano de simetría.

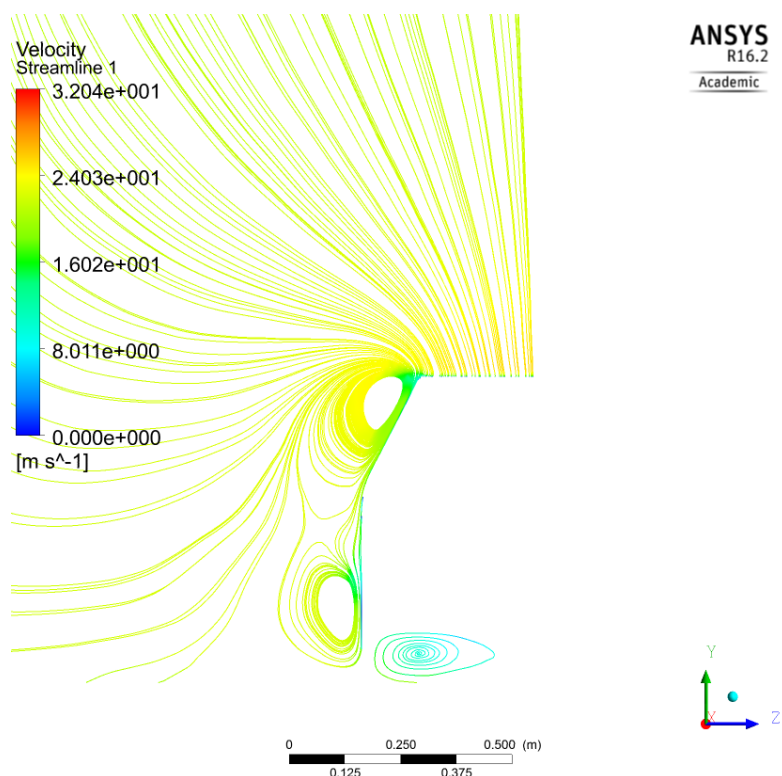


Fig. 11.34. Líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

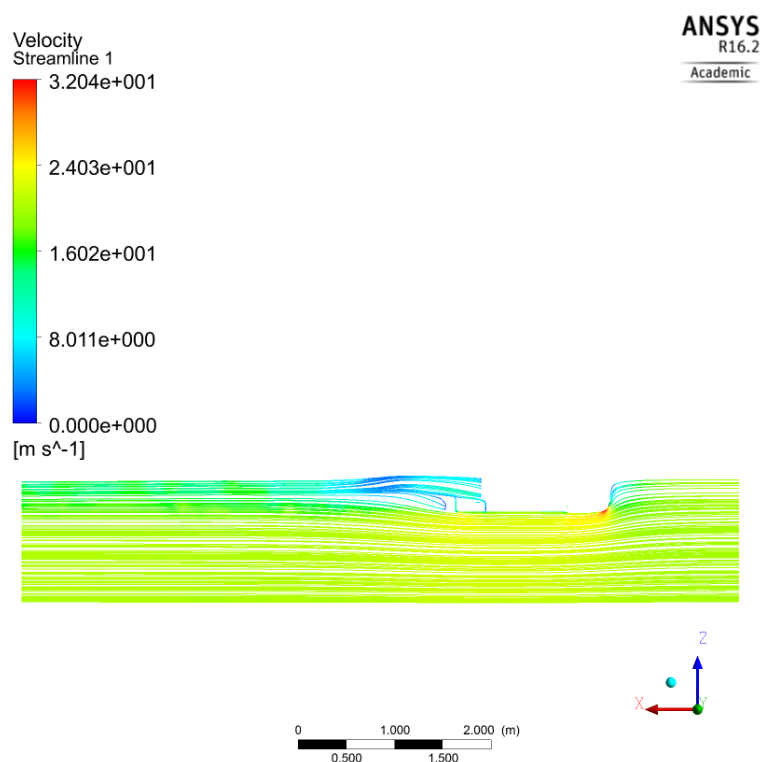


Fig. 11.35. Líneas de corriente visto en planta.

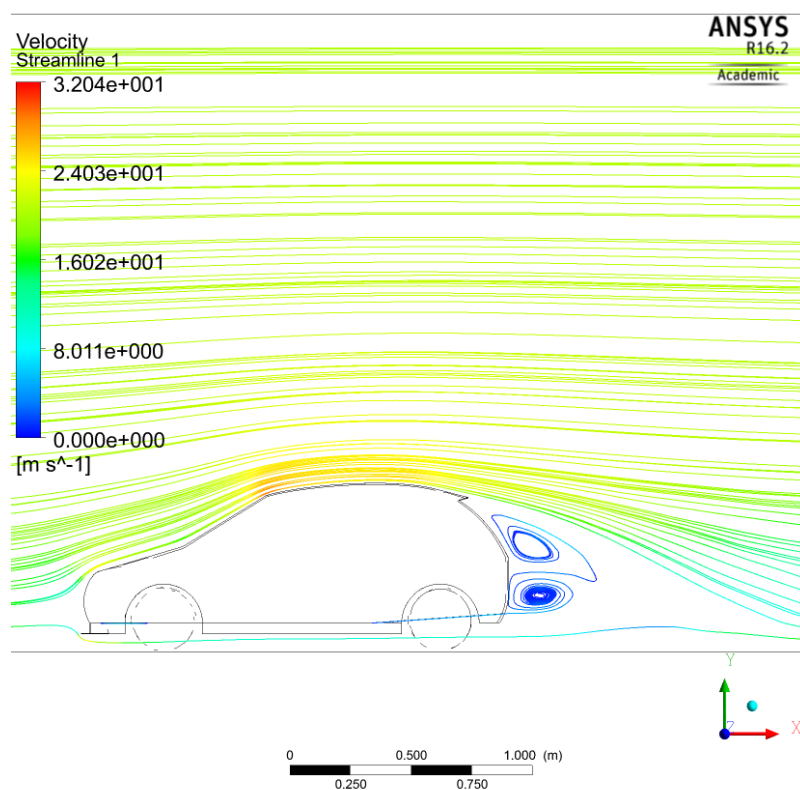


Fig. 11.36. Generación de vórtices en la parte posterior.

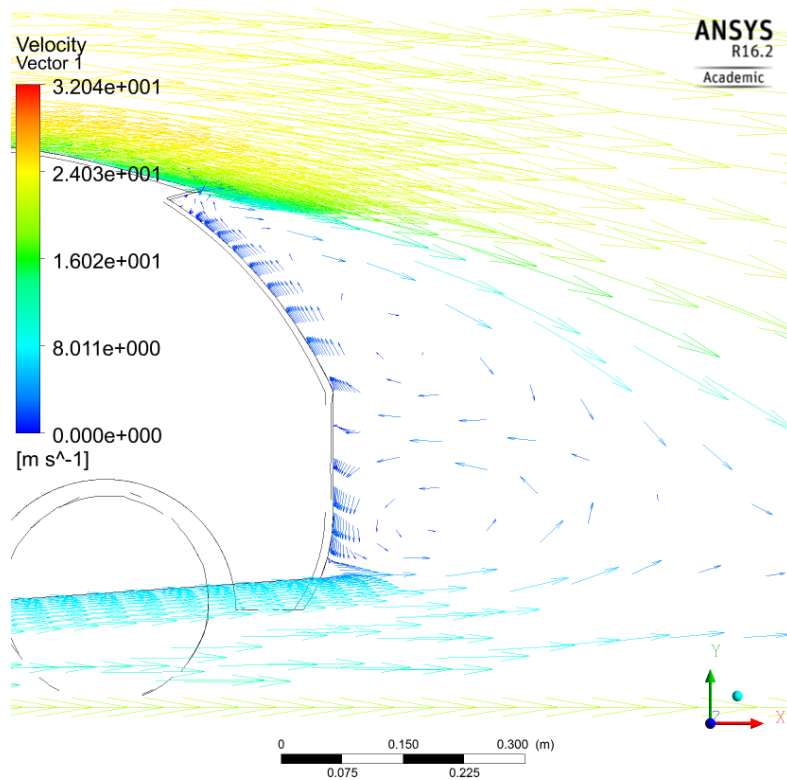


Fig. 11.37. Visualización de la estela posterior.

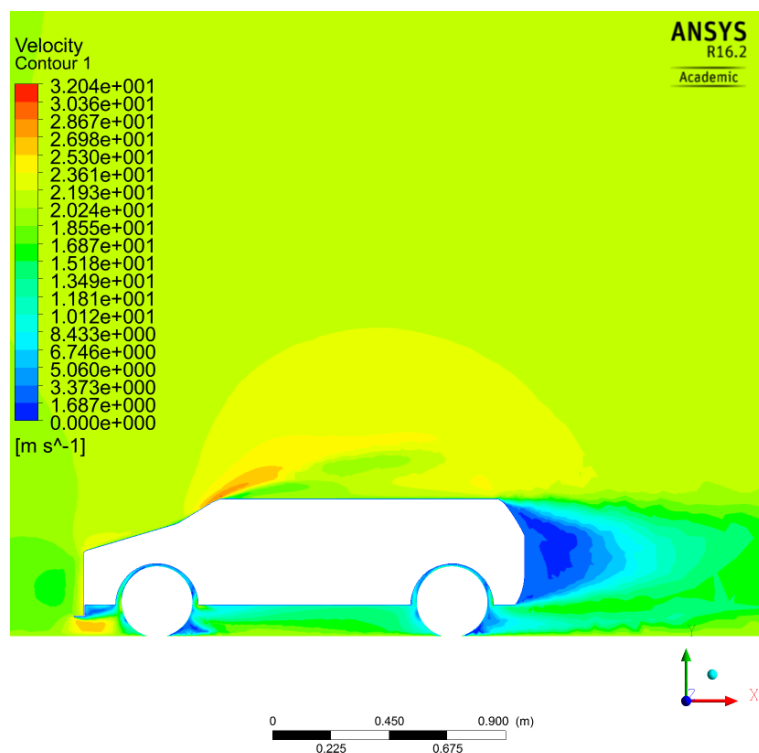


Fig. 11.38. Distribución de velocidades en el plano de perfil de las ruedas.

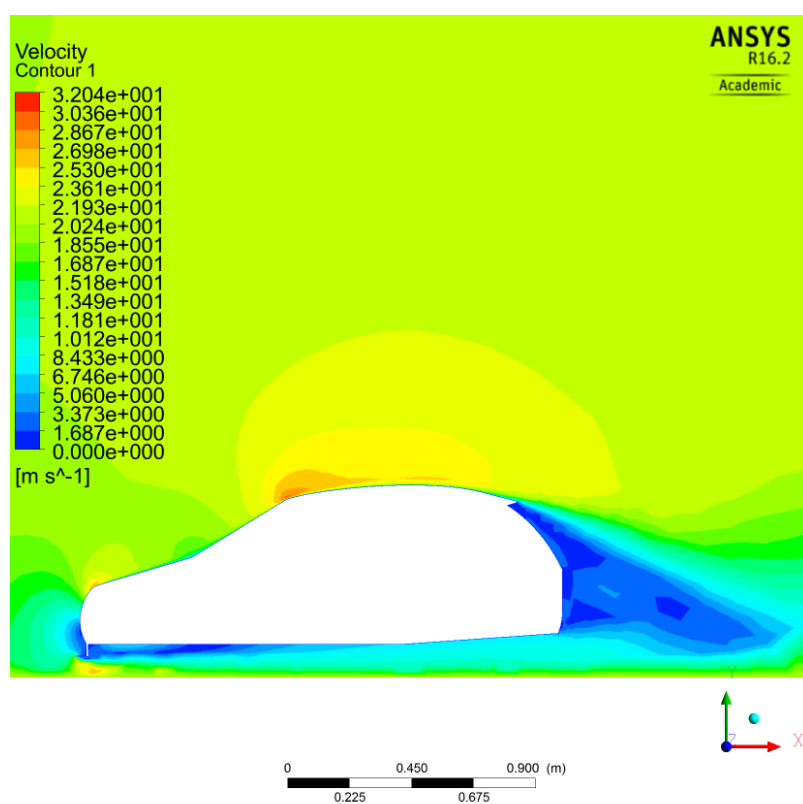


Fig. 11.39. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

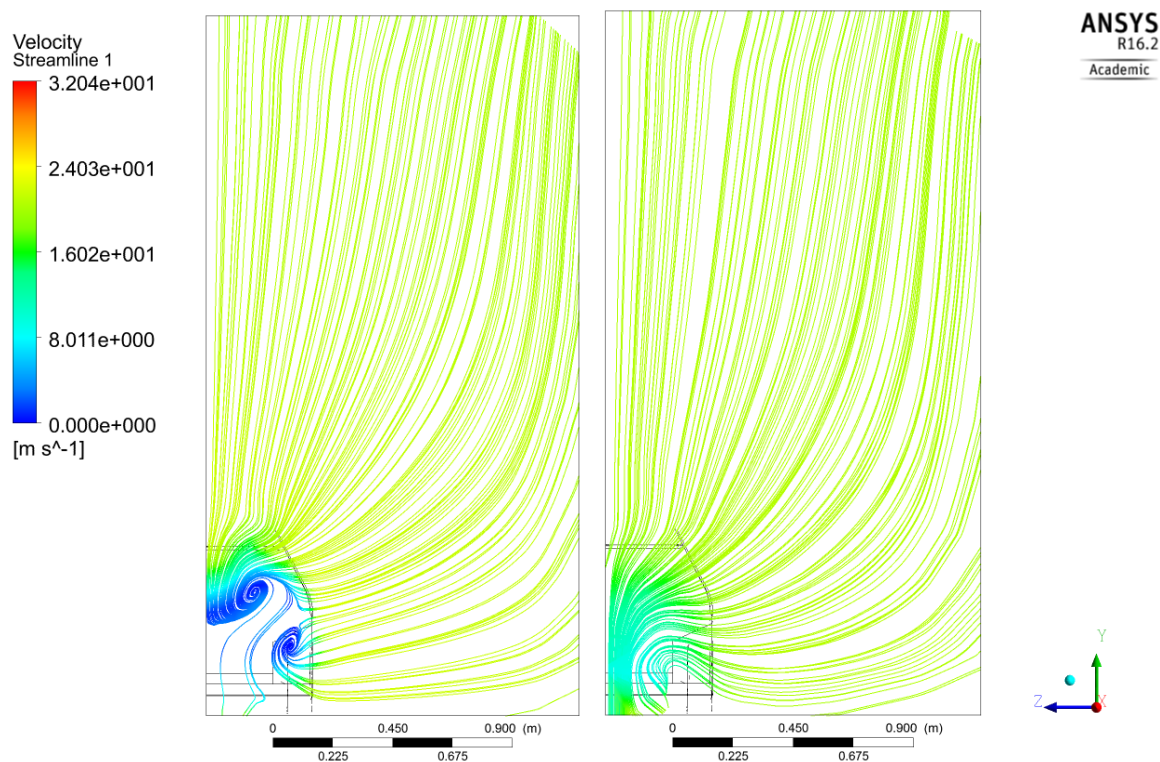


Fig. 11.40. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 1 y 2.

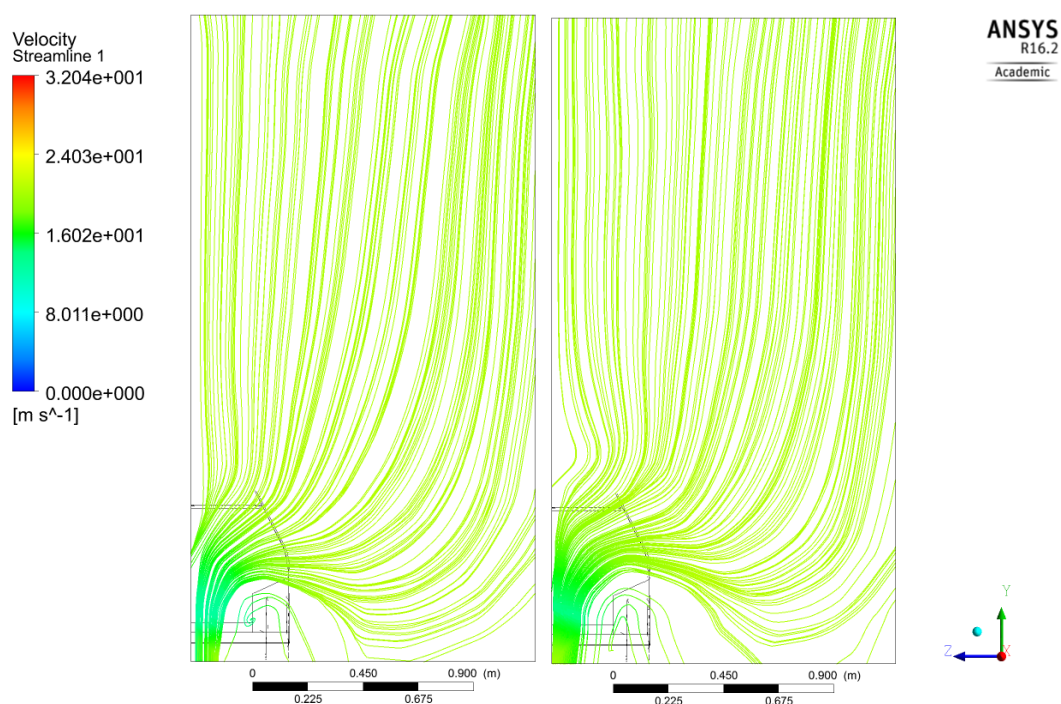


Fig. 11.41. Visualización de las turbulencia en los planos de turbulencia 3 y 4.

- **V = 35 m/s: Figuras complementarias**

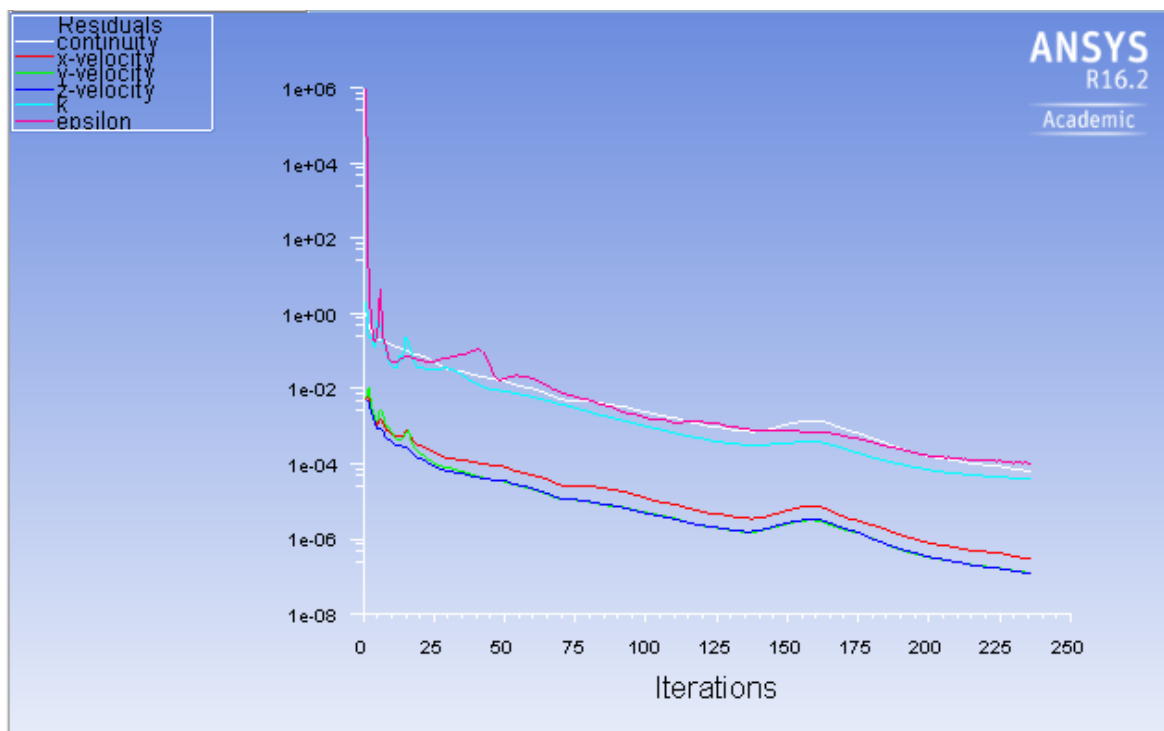


Fig. 11.42. Representación de los residuos.

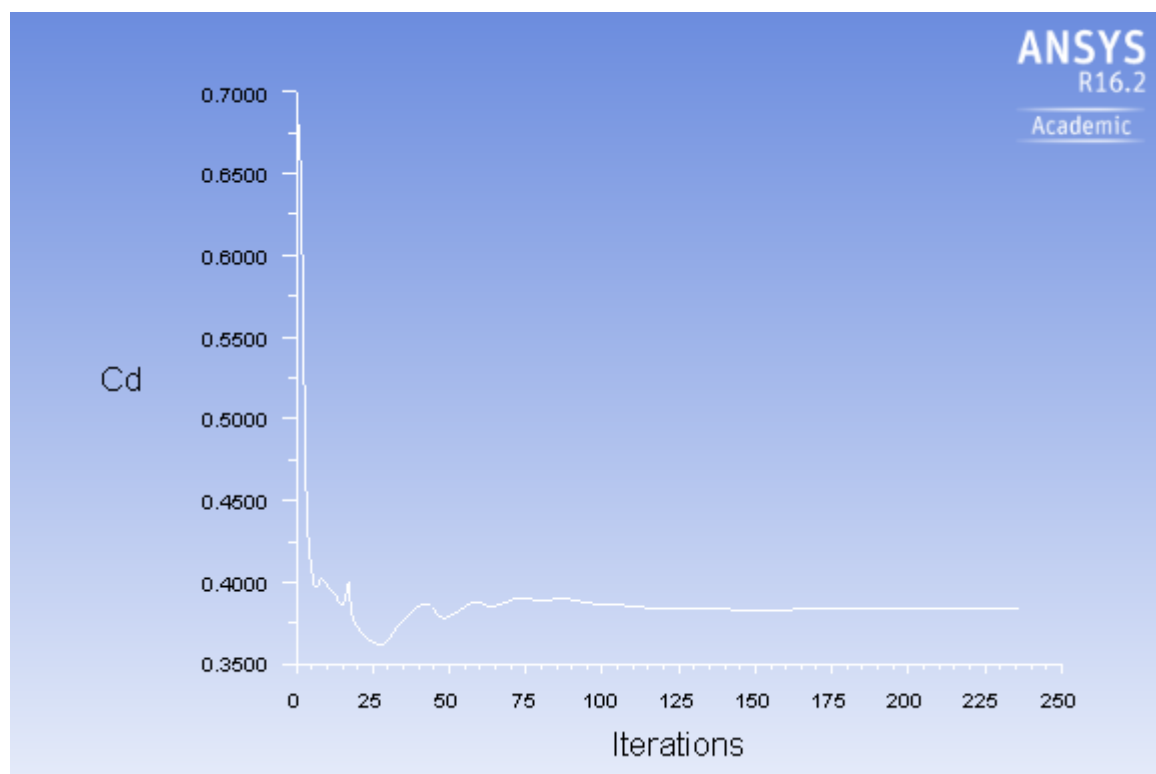


Fig. 11.43. Representación del coeficiente de resistencia al avance.

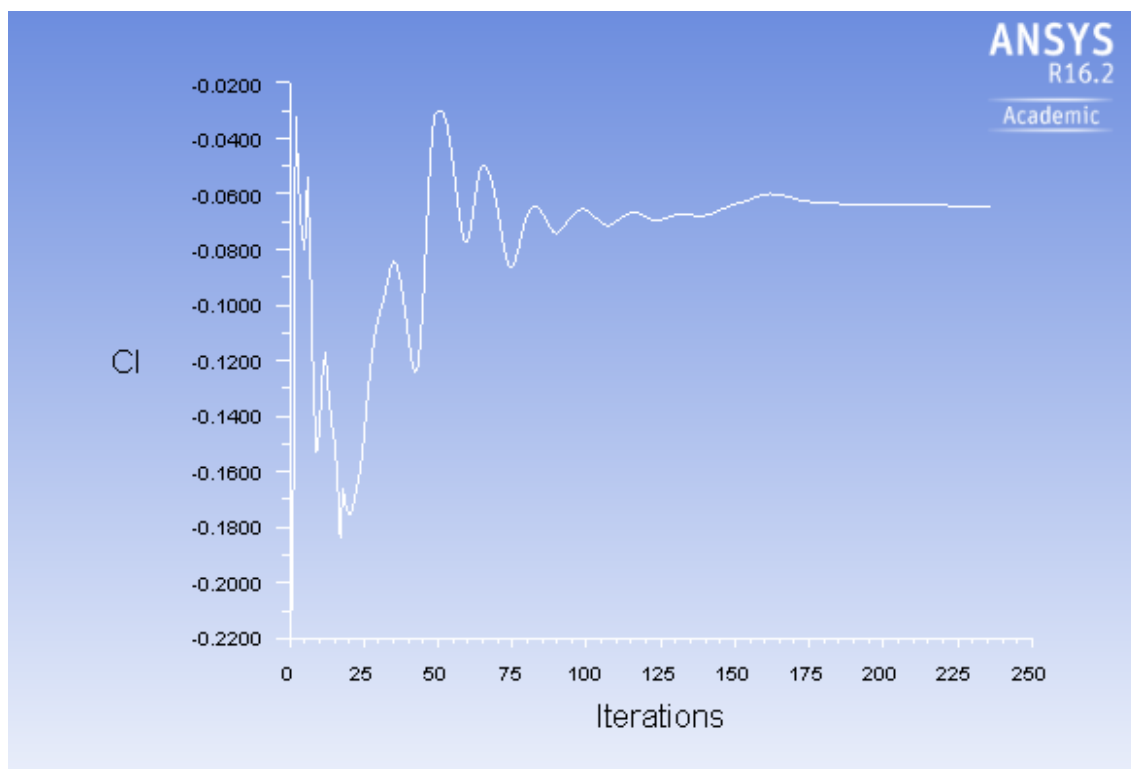


Fig. 11.44. Representación del coeficiente de sustentación.

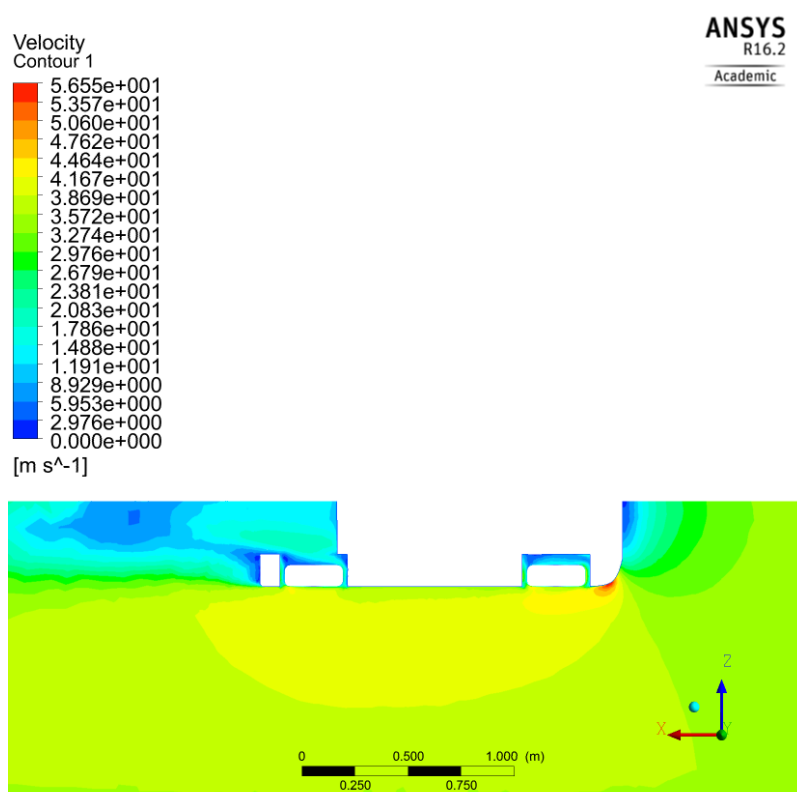


Fig. 11.45. Distribución de velocidades vista en planta.

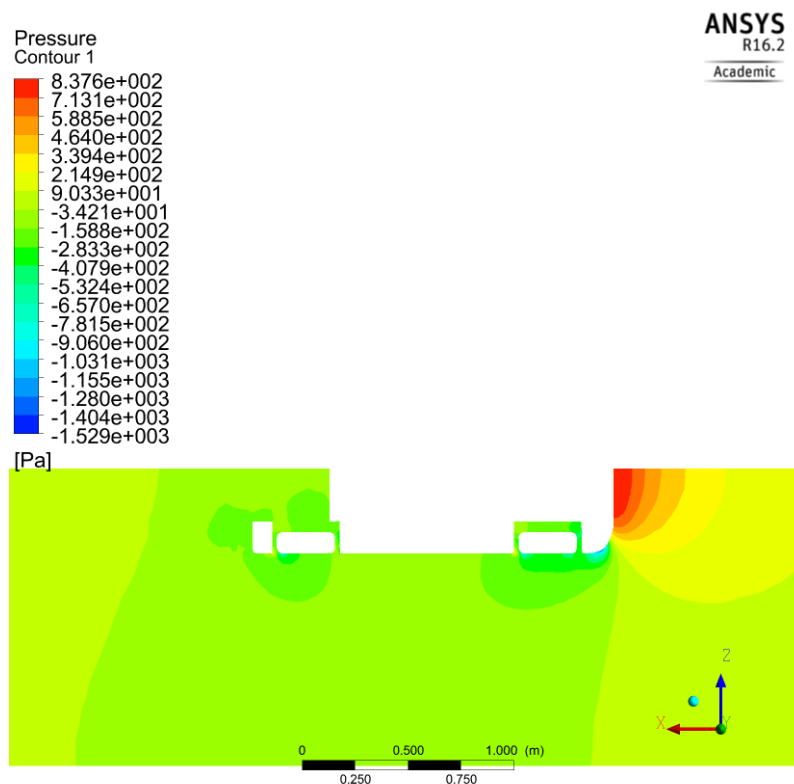


Fig. 11.46. Distribución de presiones vista en planta.

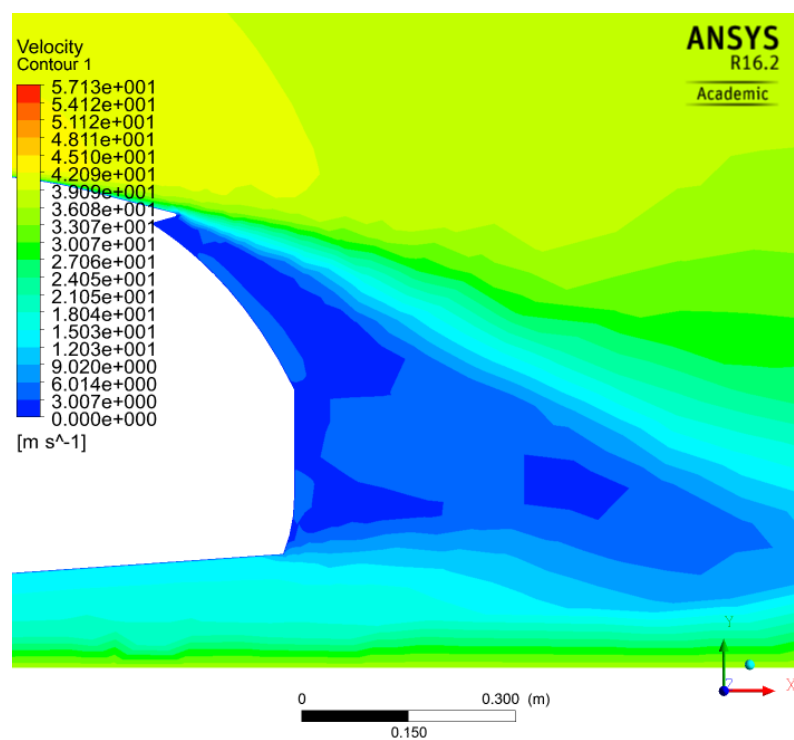


Fig. 11.47. Visualización de la estela posterior.

- **$V = 50 \text{ m/s}$**

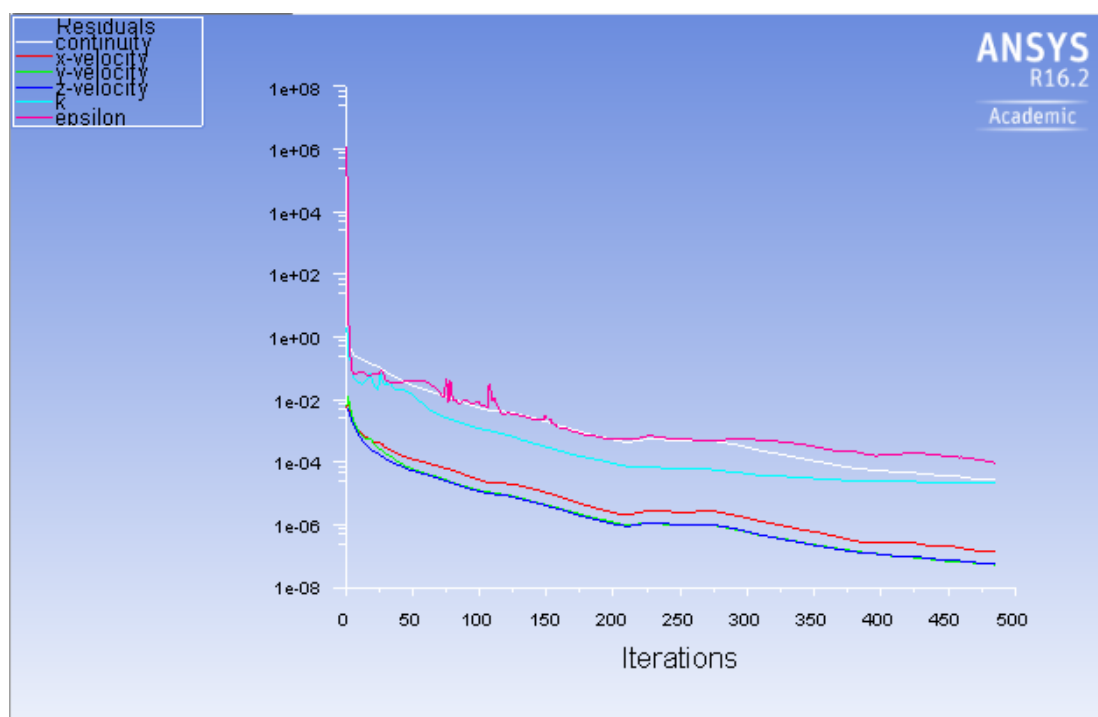


Fig. 11.48. Representación de los residuos.

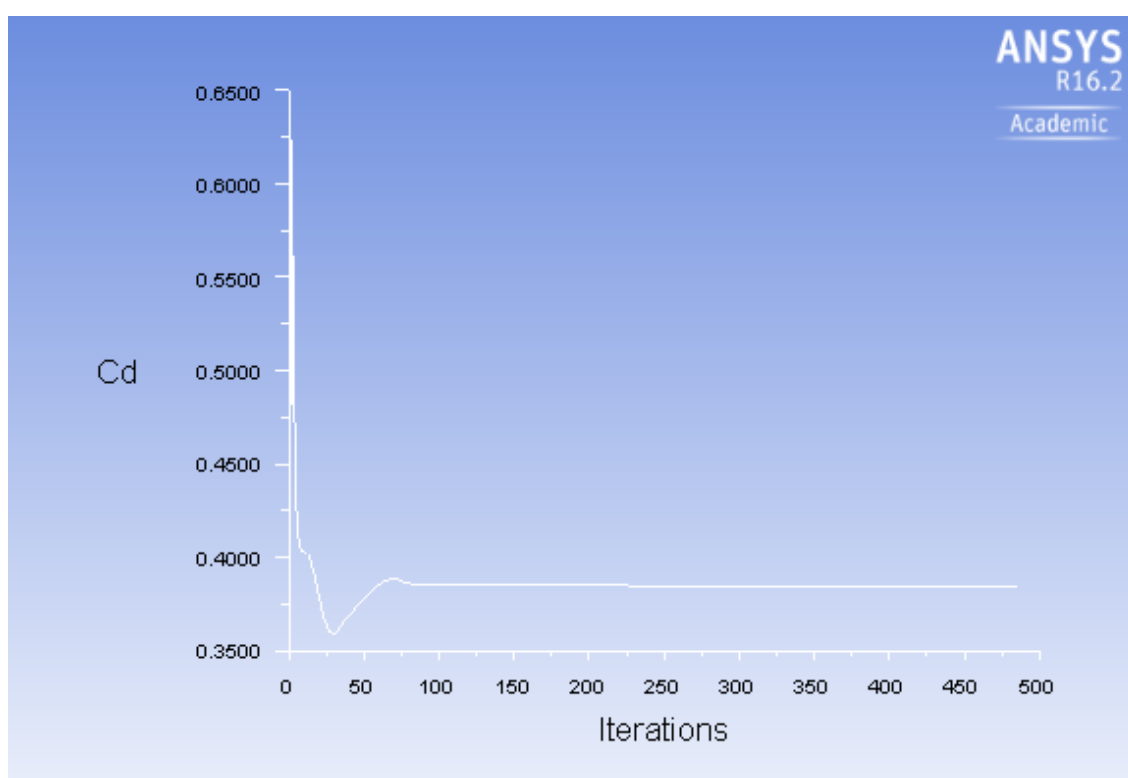


Fig. 11.49. Representación del coeficiente de resistencia al avance.

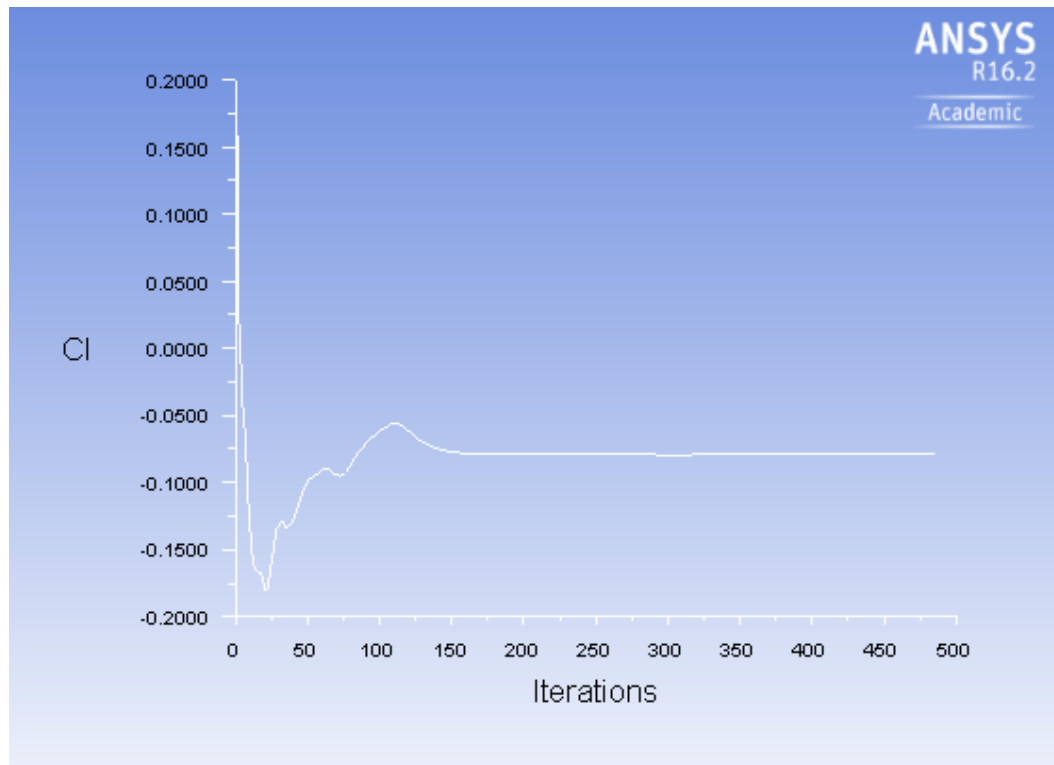


Fig. 11.50. Representación del coeficiente de sustentación.

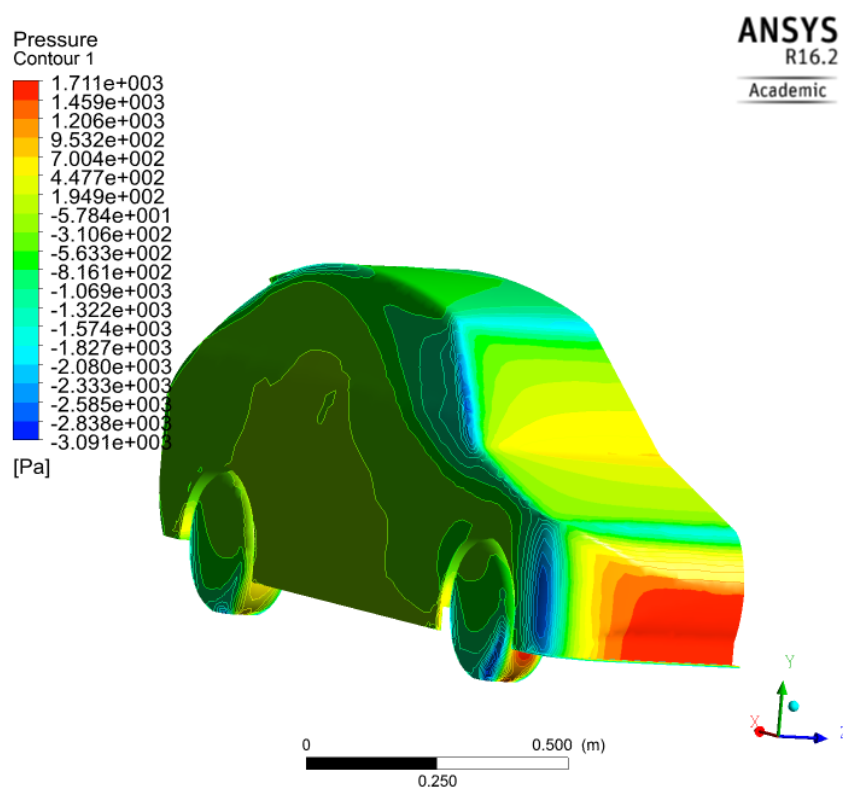


Fig. 11.51. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

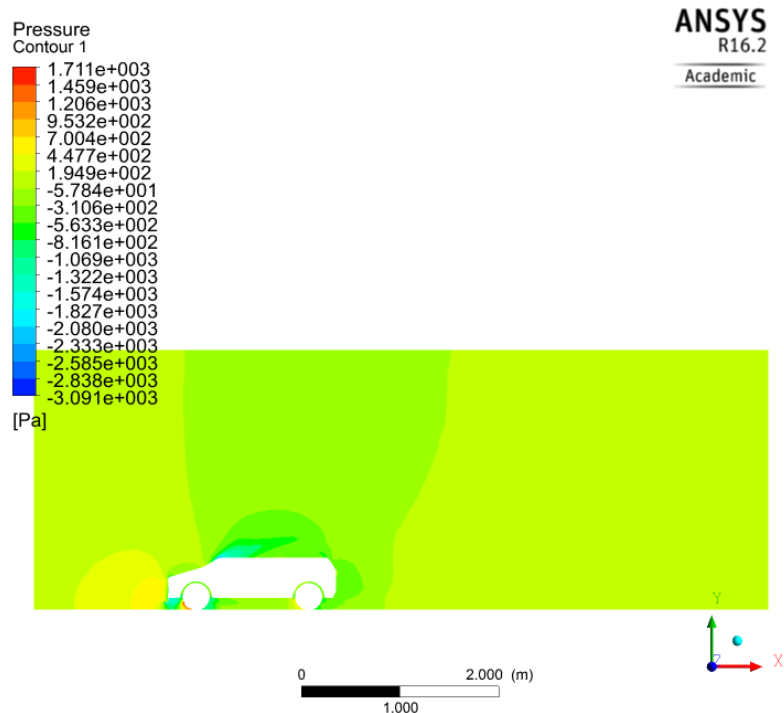


Fig. 11.52. Distribución de presiones en el plano de perfil de las ruedas.

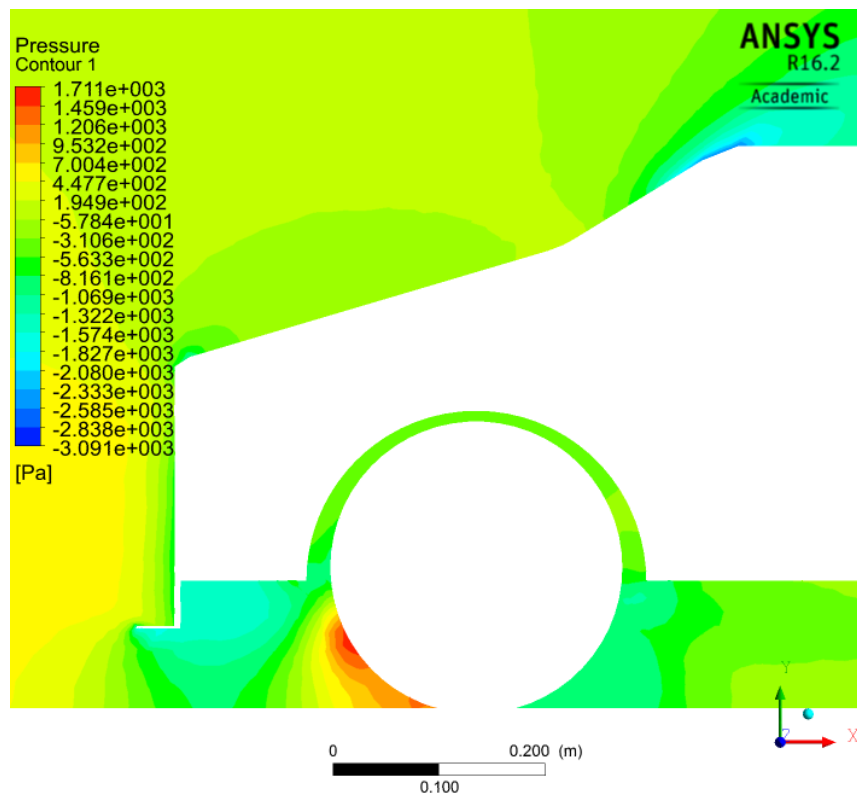


Fig. 11.53. Visualización del punto de estancamiento de la rueda delantera.

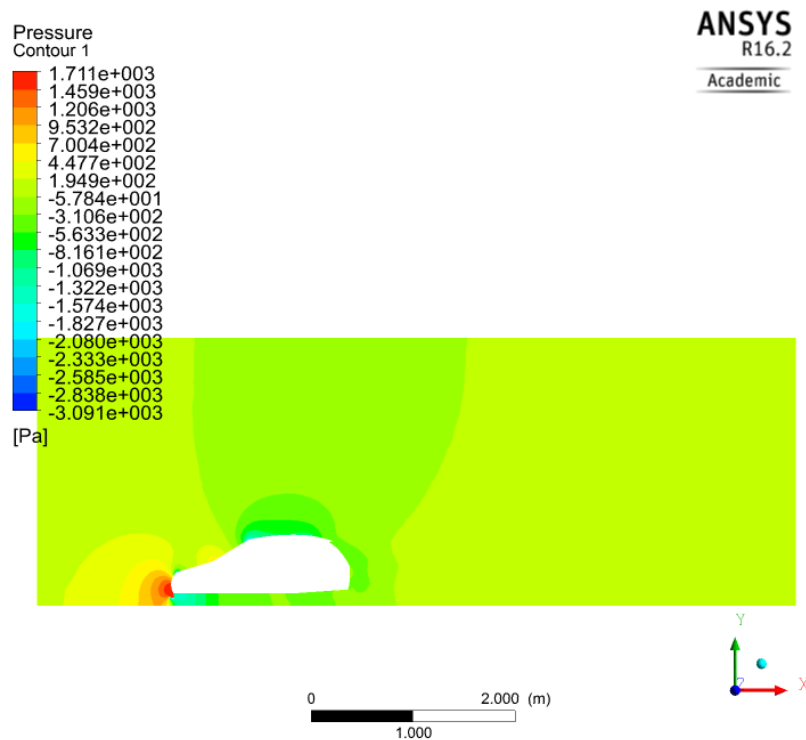


Fig. 11.54. Distribución de presiones en el plano de simetría.

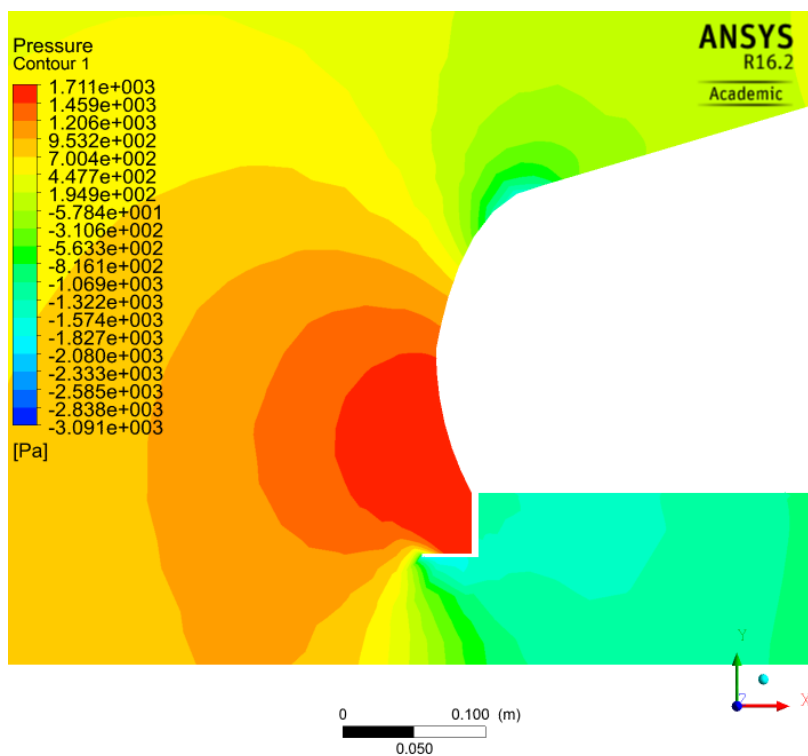


Fig. 11.55. Distribución de presiones en el spoiler delantero.

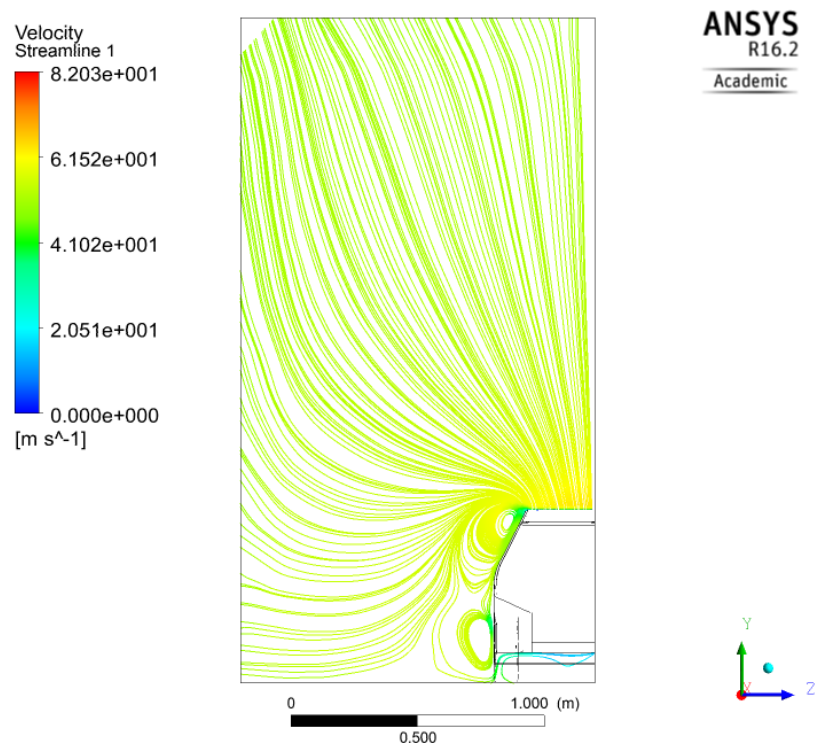


Fig. 11.56. Líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

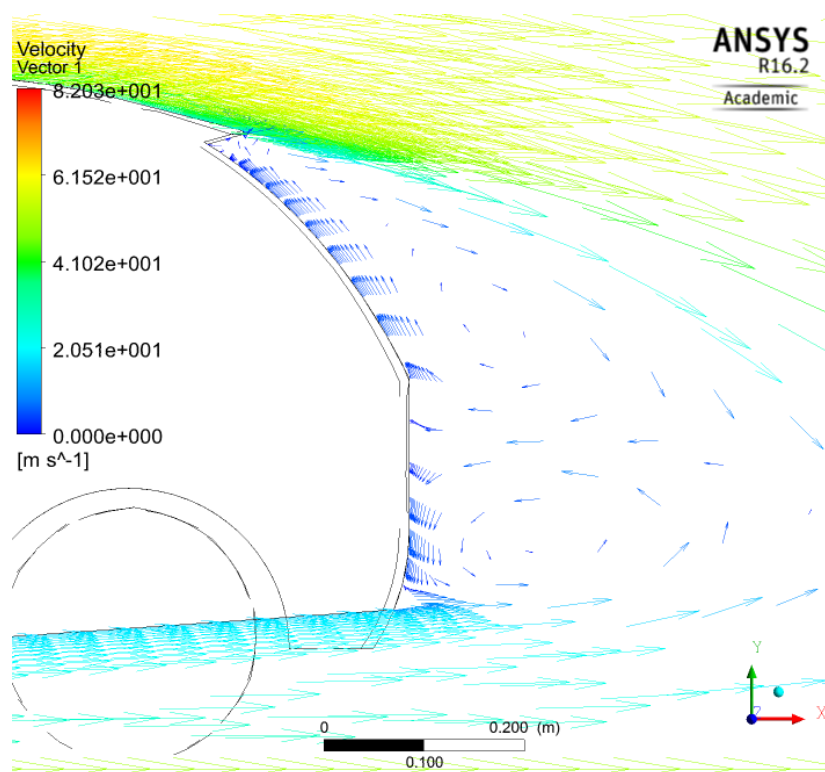


Fig. 11.57. Distribución de velocidades en la estela posterior del vehículo.

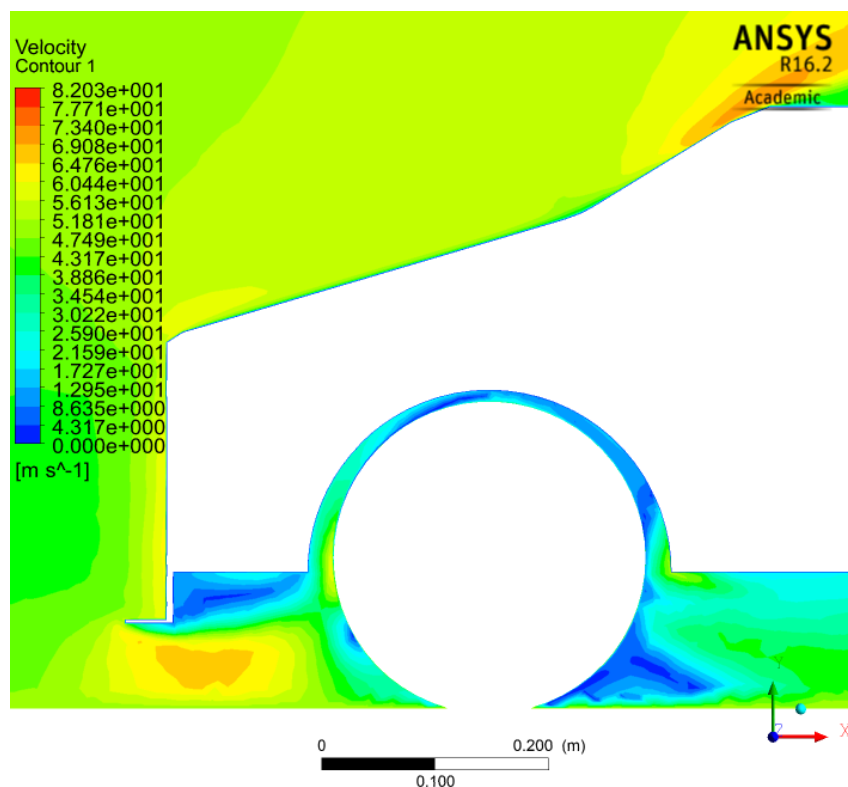


Fig. 11.58. Distribución de velocidades en la parte delantera.

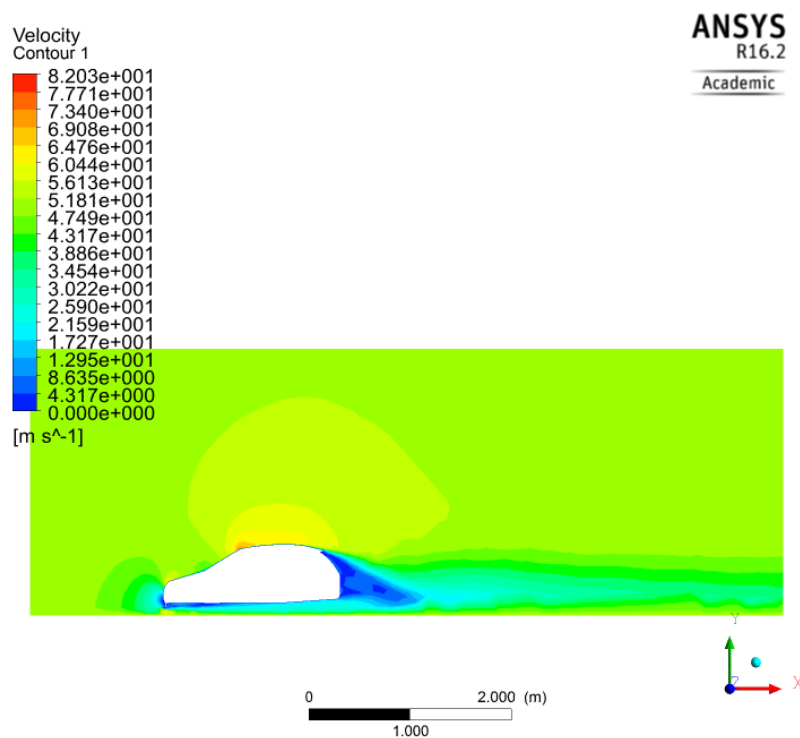


Fig. 11.59. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

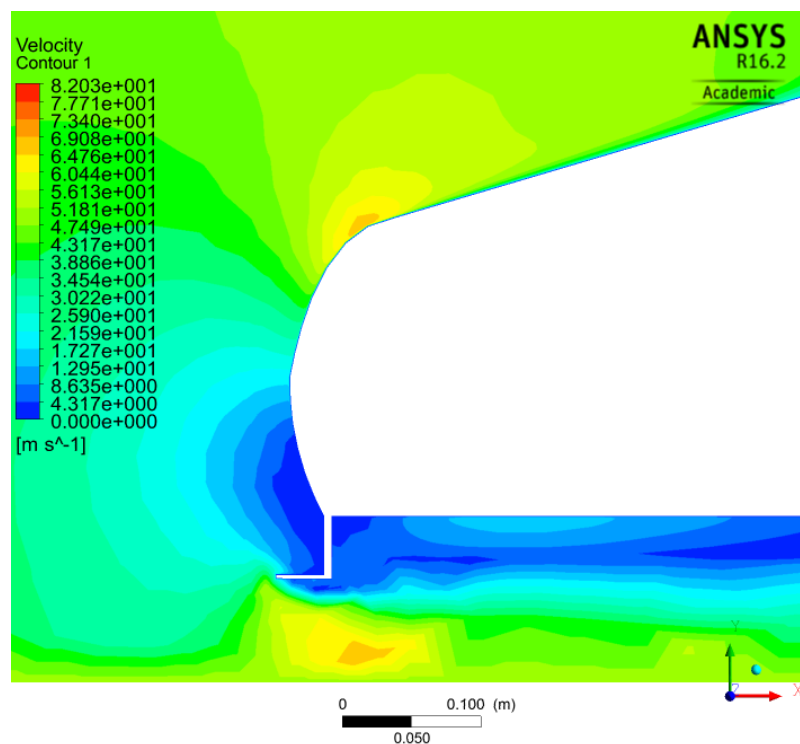


Fig. 11.60. Distribución de velocidades alrededor del spoiler delantero.

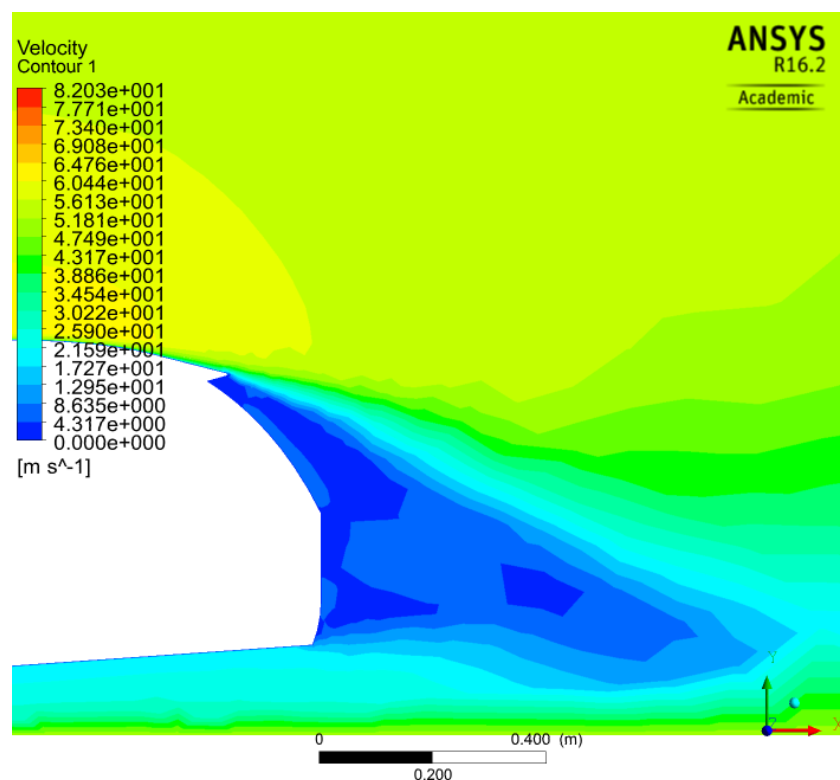


Fig. 11.61. Distribución de velocidades en la estela posterior.

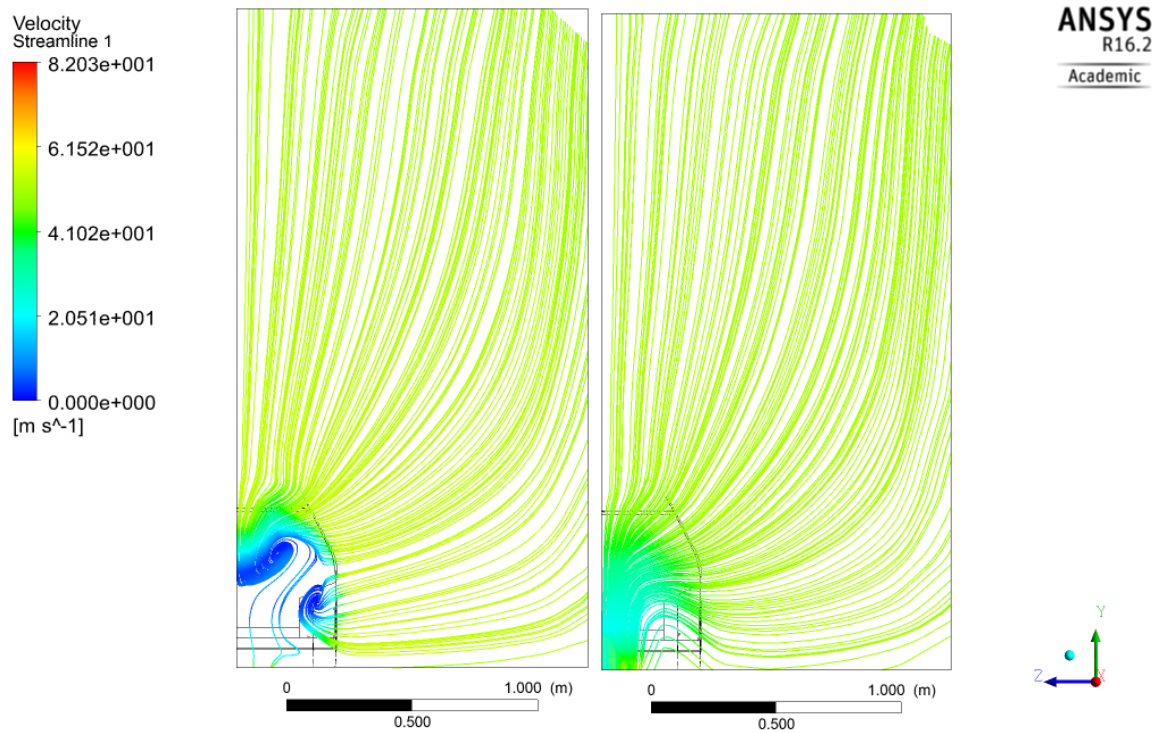


Fig. 11.62. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 1 y 2.

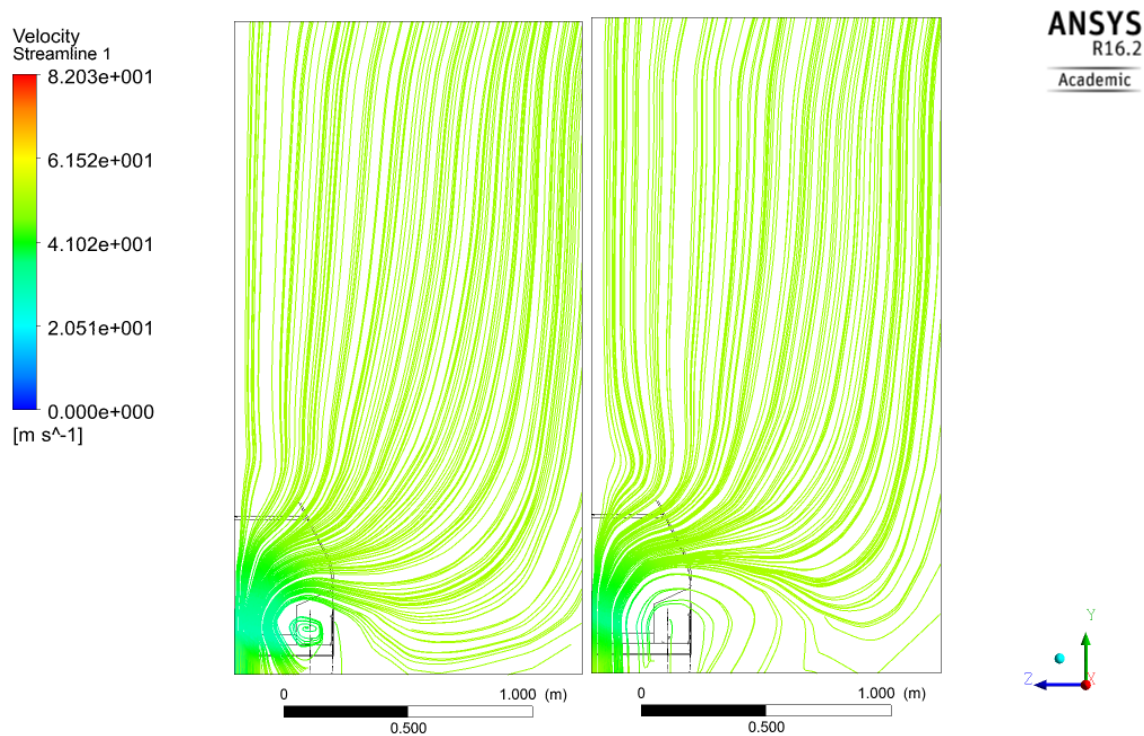


Fig. 11.63. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 3 y 4.

D. Visualización de resultados con más carga aerodinámica

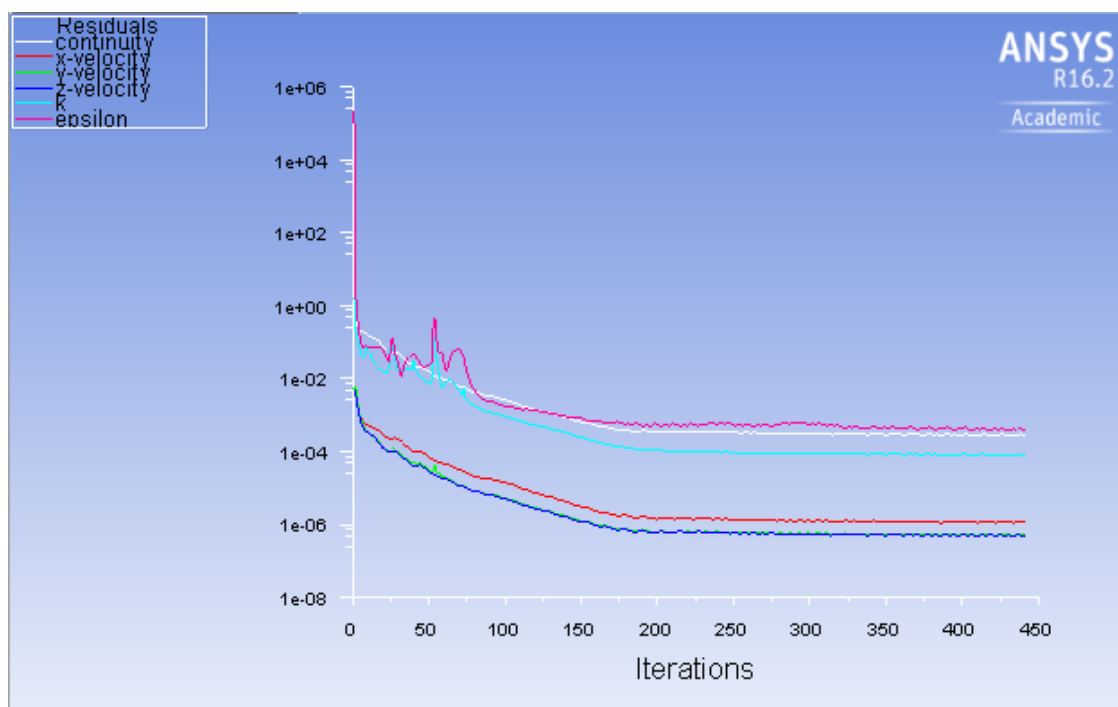


Fig. 11.64. Representación de los residuos.

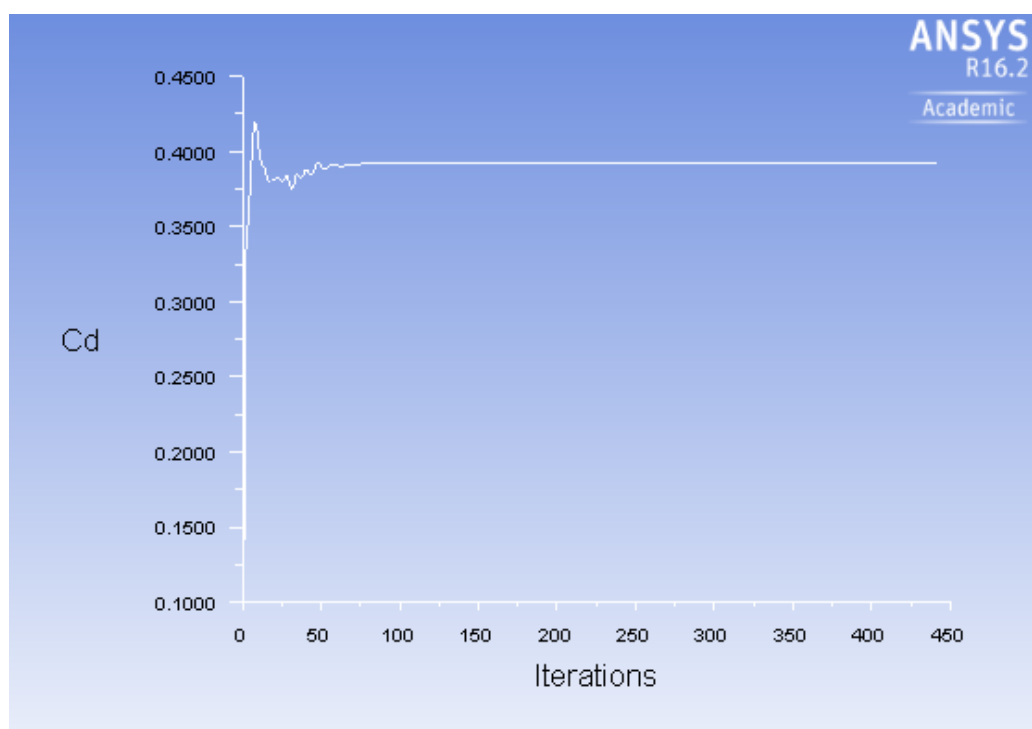


Fig. 11.65. Representación del coeficiente de resistencia al avance.

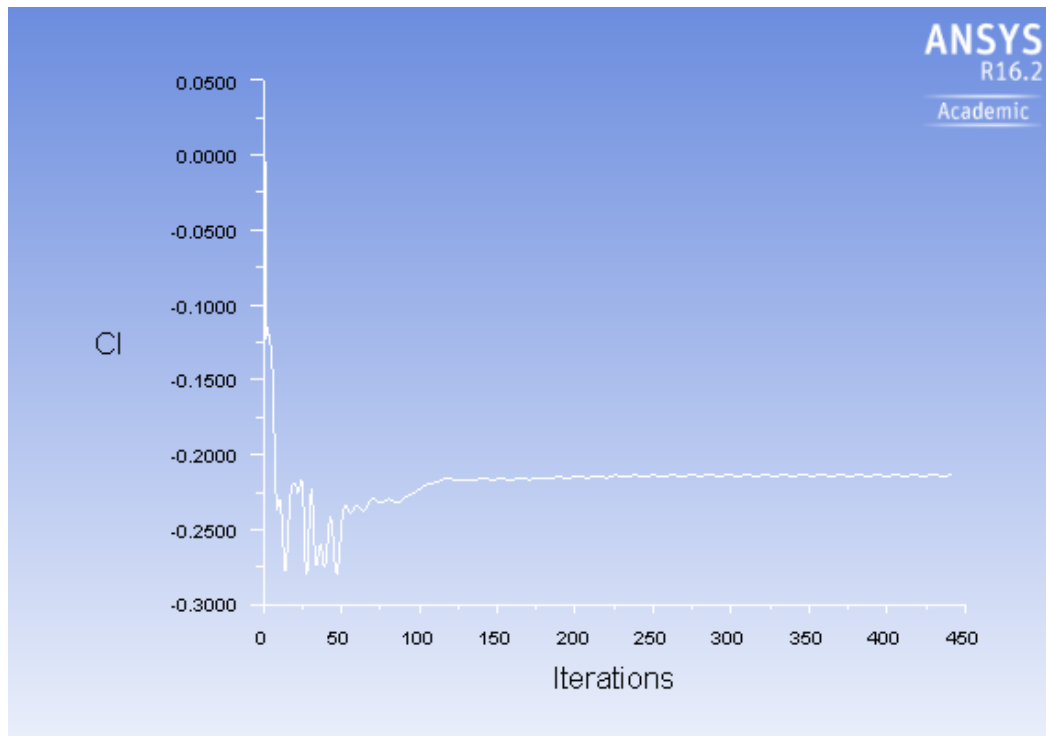


Fig. 11.66. Representación del coeficiente de sustentación.

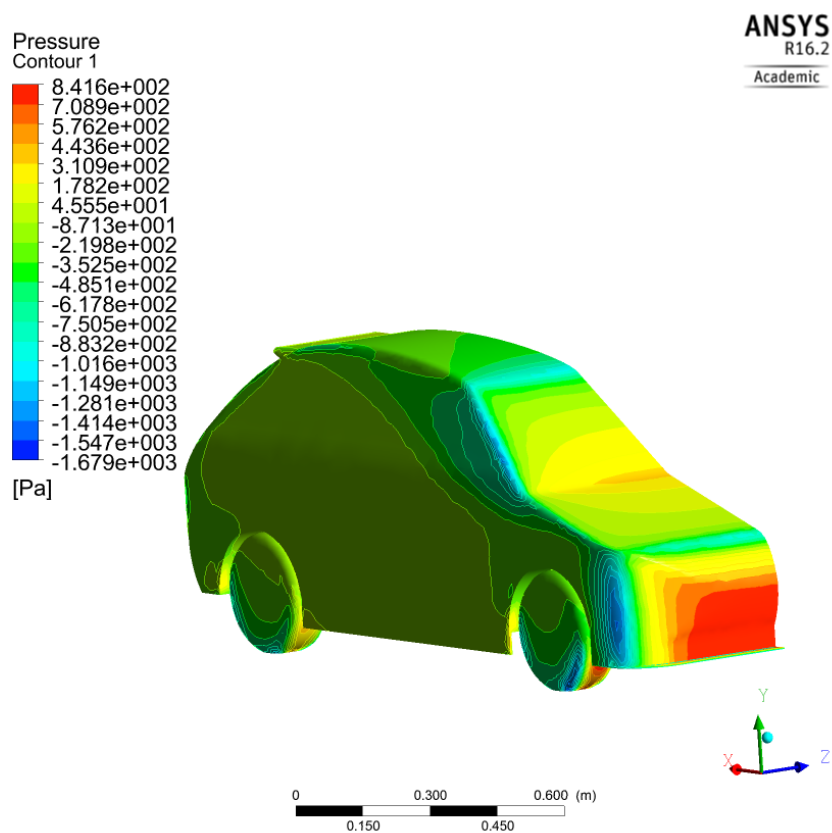


Fig. 11.67. Distribución de presiones en las superficies del vehículo.

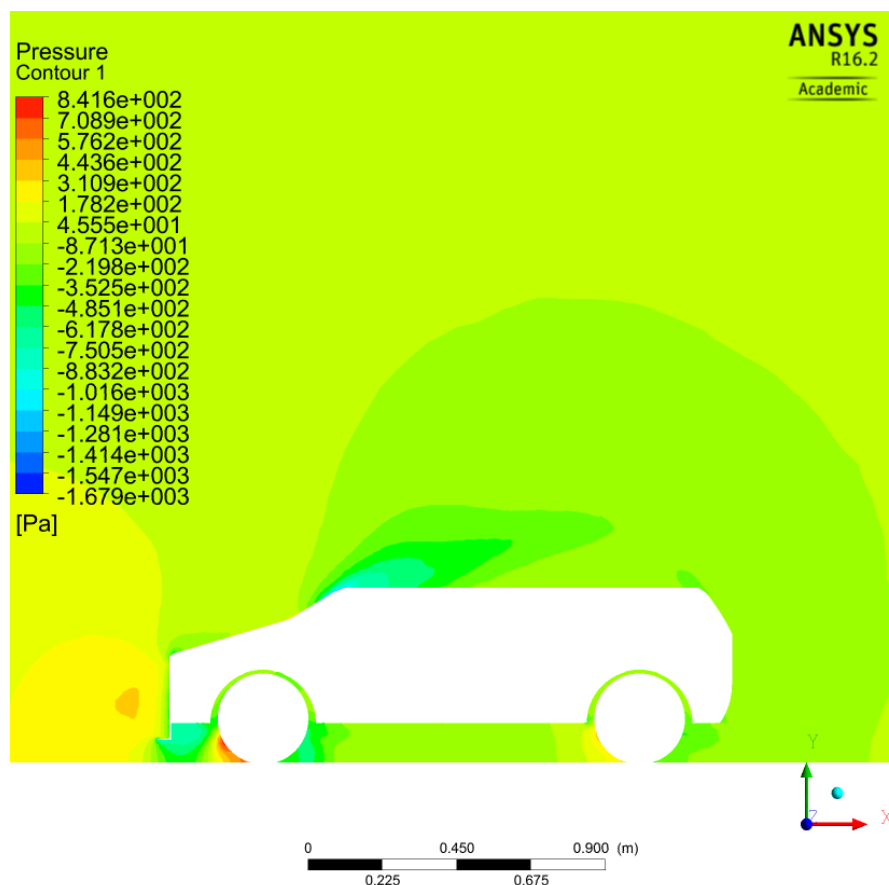


Fig. 11.68. Detalle de la distribución de presiones en el plano de simetría de las ruedas.

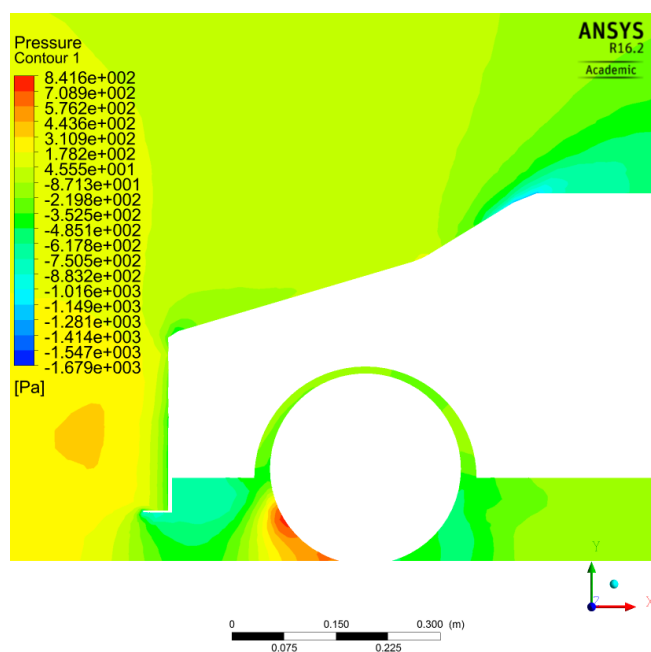


Fig. 11.69. Distribución de presiones en la parte delantera.

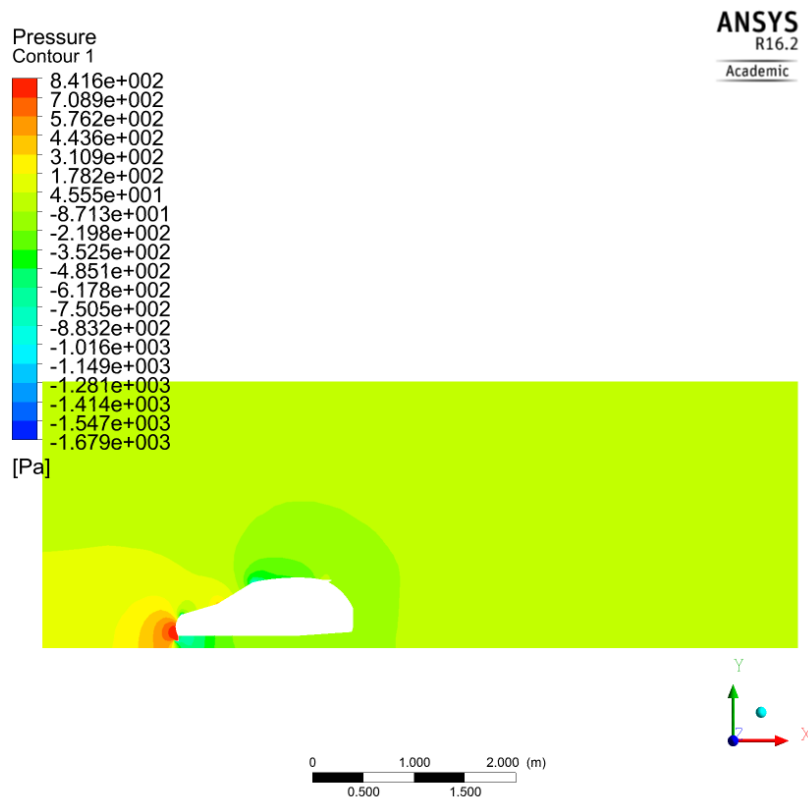


Fig. 11.70. Distribución de presiones en el plano de simetría.

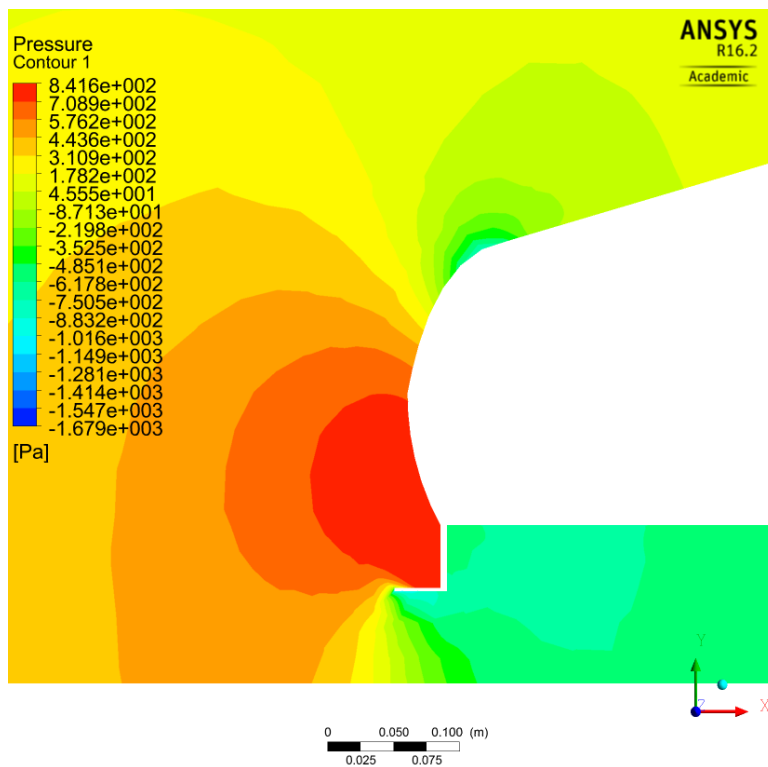


Fig. 11.71. Distribución de presiones en el spoiler delantero.

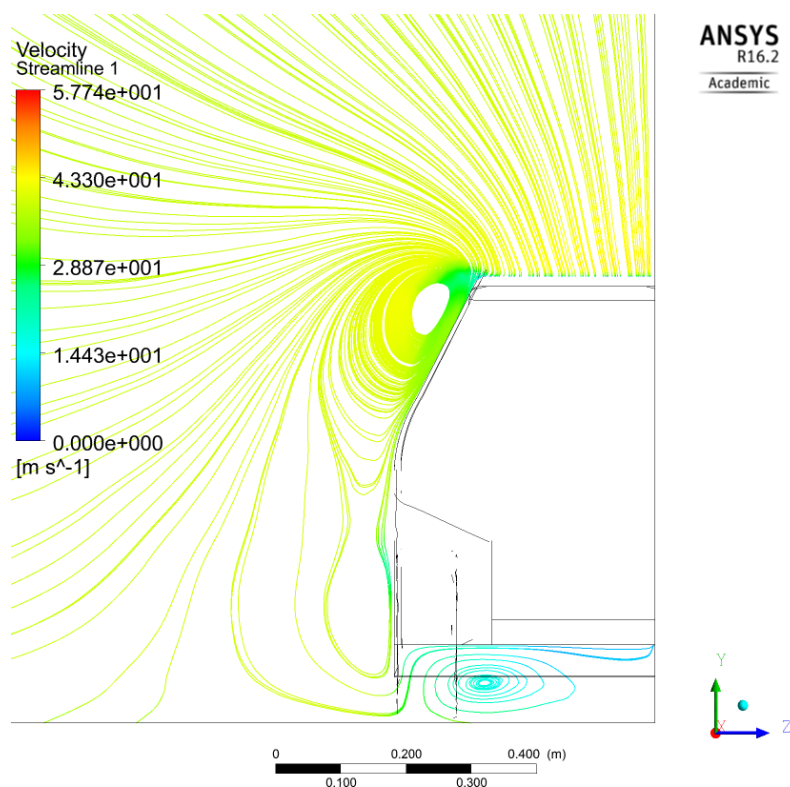


Fig. 11.72. Detalle de las líneas de corriente en el plano de visualización de los laterales.

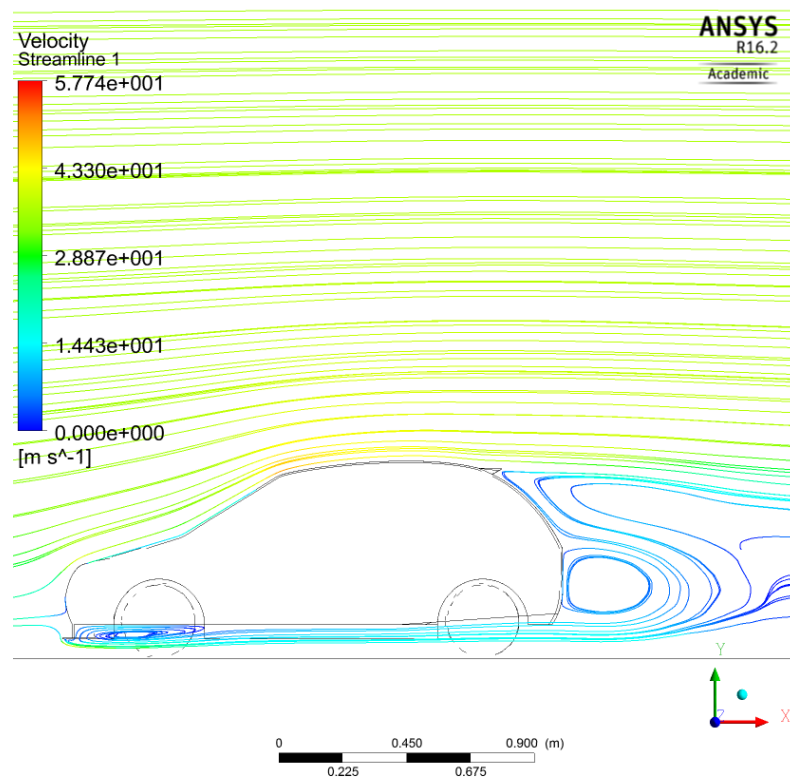


Fig. 11.73. Detalle de las líneas de corriente en el plano de simetría.

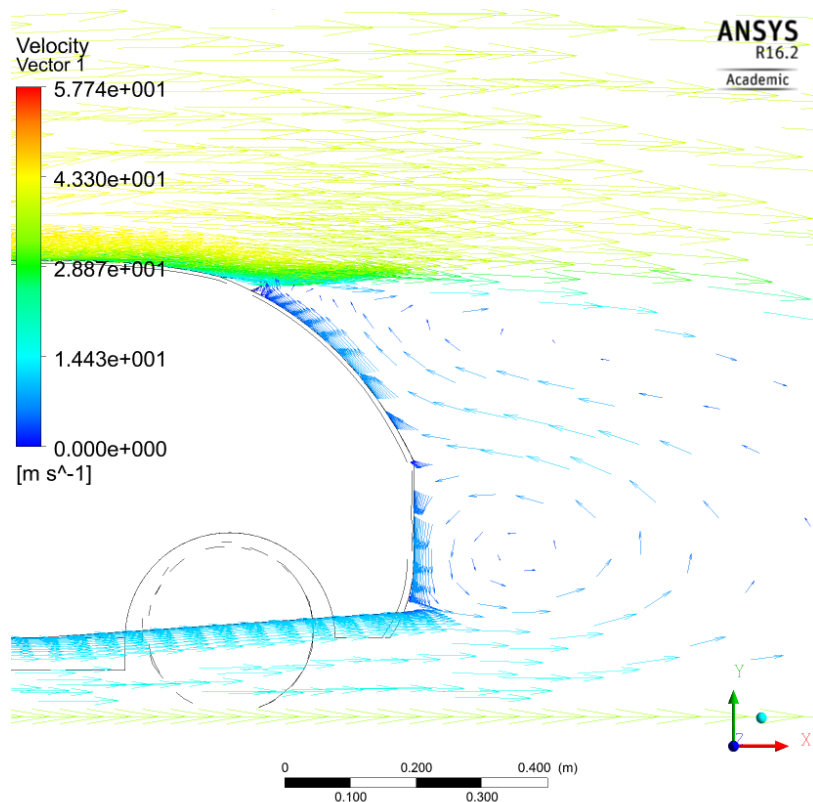


Fig. 11.74. Distribución de velocidades en la estela posterior.

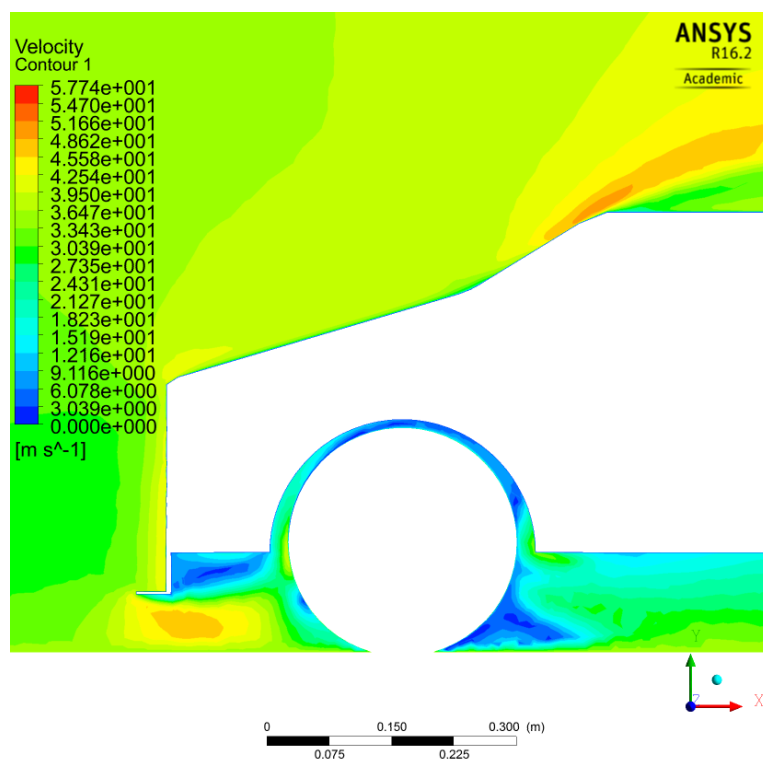


Fig. 11.75. Distribución de velocidades en la parte delantera.

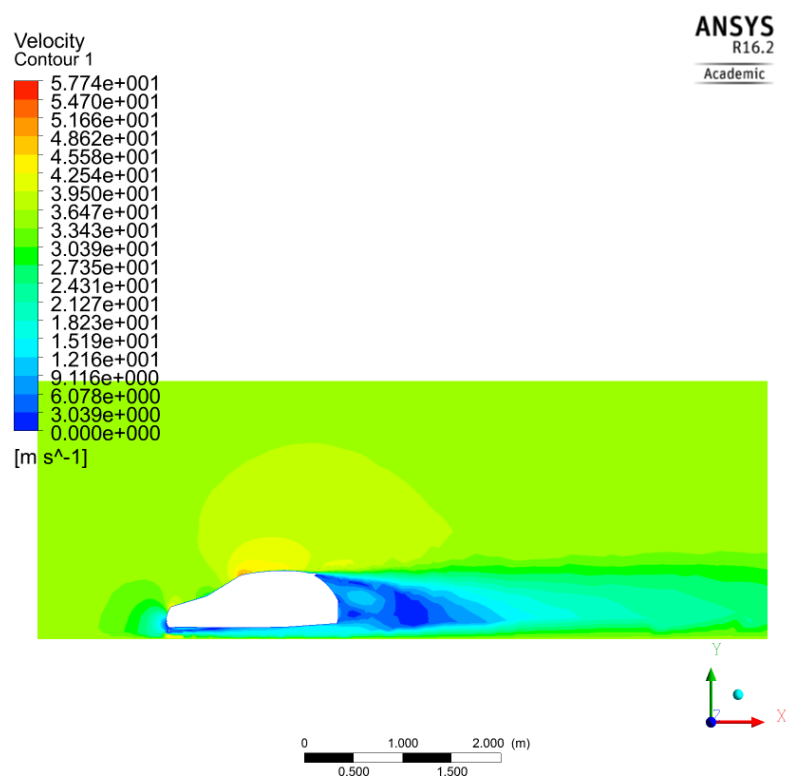


Fig. 11.76. Distribución de velocidades en el plano de simetría.

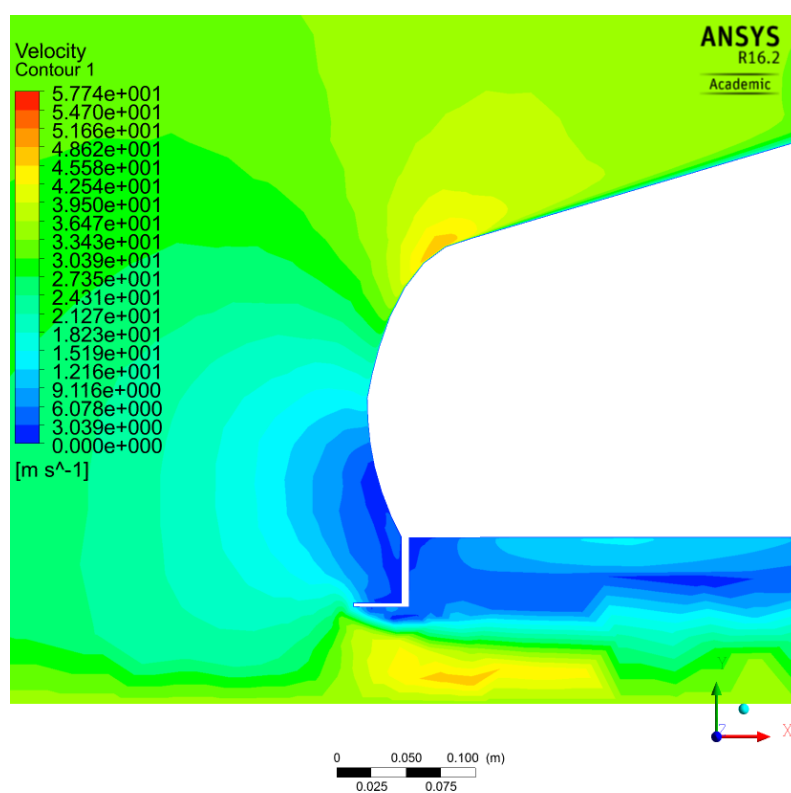


Fig. 11.77. Distribución de velocidades en el spoiler delantero.

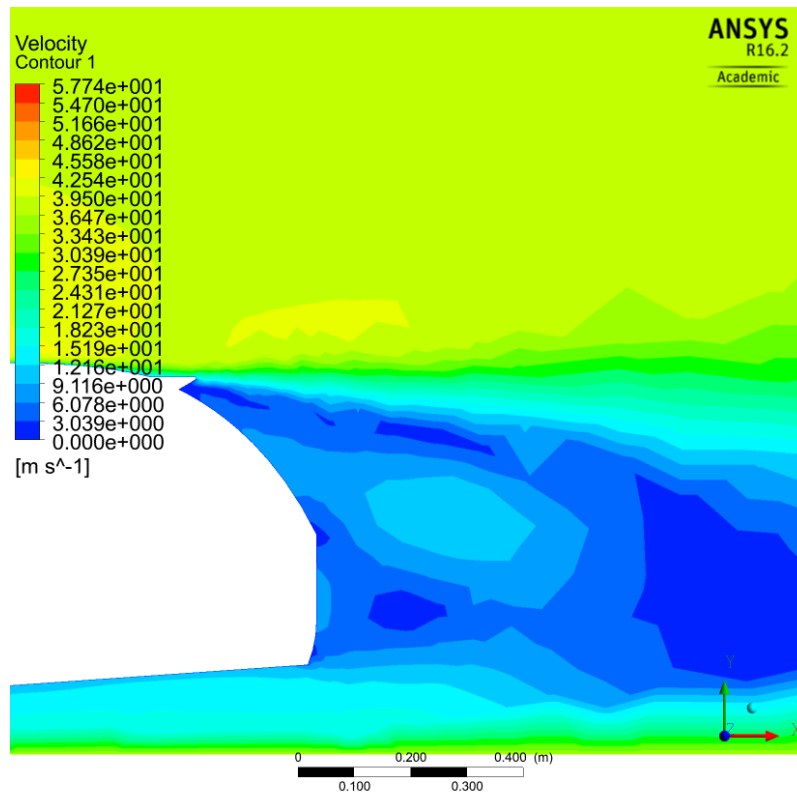


Fig. 11.78. Distribución de velocidades en la parte trasera.

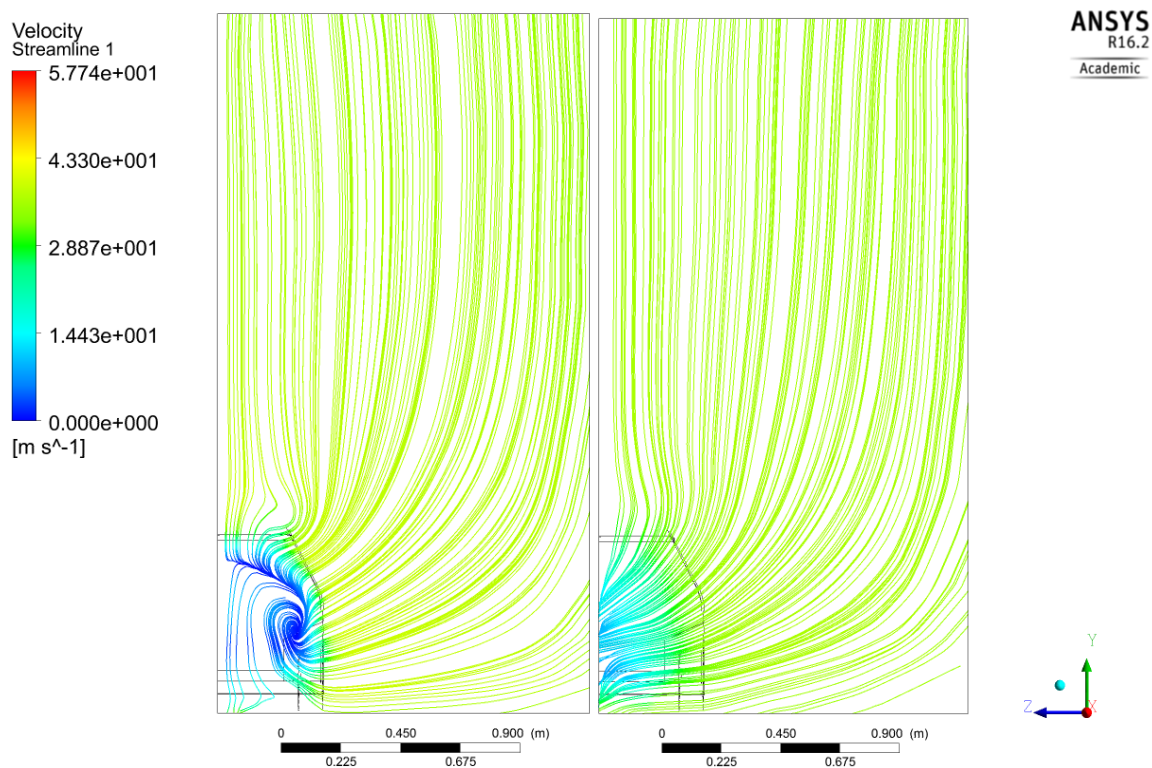


Fig. 11.79. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 1 y 2.

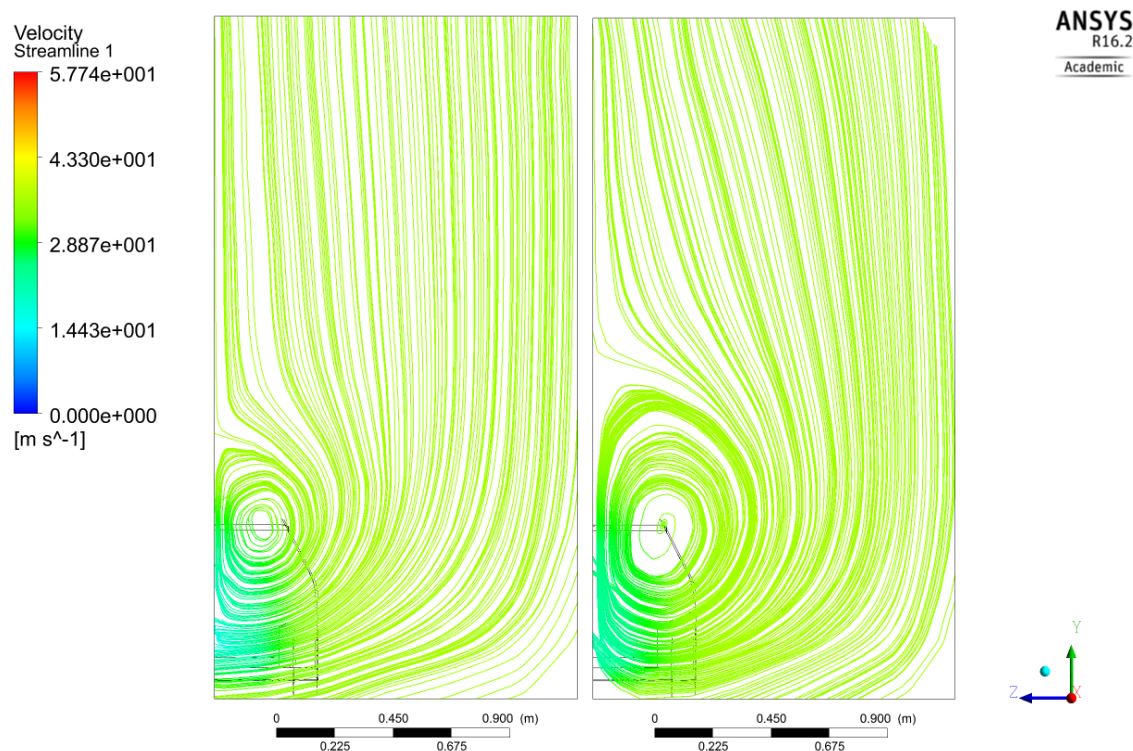


Fig. 11.80. Visualización de la turbulencia en los planos de turbulencia 3 y 4.

E. Otros

- Compra de un ordenador de sobremesa HP como el de la universidad por 953,98€.
 - Ordenador HP Pavilion 550-171ns: 799€
 - Raton HPX1000: 9,99€
 - Teclado: 15,99€
 - Monitor de 22": 129€